UNIVERSITÄT INNSBRUCK
Physikalisches Institut

ELEMENTARE VORLESUNGEN

ÜBER

ELEKTRIZITÄT UND MAGNETISMUS

VON

SILVANUS P. THOMPSON
PROFESSOR DER PHYSIK AM TECHNICAL COLLEGE ZU LONDON

AUTORISIERTE DEUTSCHE ÜBERSETZUNG
AUF GRUND DER NEUESTEN AUFLAGE DES ORIGINALS

VON

DR. A. HIMSTEDT

ZWEITE AUFLAGE

MIT 283 ABBILDUNGEN IM TEXT

TÜBINGEN 1897
VERLAG DER H. LAUPP'SCHEN BUCHHANDLUNG

Druck von H. Laupp jr in Tübingen.

K. K.
UNIVERSITÄT INNSBRUCK
Physikalisches Institut
I 143

ELEKTRIZITÄT UND MAGNETISMUS

Vorrede zur zweiten Auflage der Uebersetzung.

Seit dem ersten Erscheinen dieser Vorlesungen in deutscher Sprache sind zehn Jahre verflossen. Die mannigfachen Fortschritte, welche die Wissenschaft in dieser Zeit gemacht hat, haben bedeutendere Verbesserungen und Erweiterungen des Textes notwendig gemacht. So weisen z. B. die Abschnitte, welche von den Influenzmaschinen sowie von der Selbstinduktion handeln, eine grössere Ausführlichkeit auf. In der Lehre vom Elektromagnetismus finden sich zwei neue Vorlesungen über die magnetischen Eigenschaften des Eisens und über das Prinzip des magnetischen Kreises. Auch die Vorlesung über elektrische Energie ist neu. Die bis dahin wenig bekannten Eigenschaften der Wechselströme haben im 10. Kapitel eine eingehende Berücksichtigung gefunden. Endlich ist die Elektro-Optik durch die Lehre von den elektrischen Wellen und besonders durch die Hertz'schen Versuche wesentlich vervollständigt worden. Ein kurzer Artikel über Röntgen-Strahlen ist anhangsweise gegeben.

Marienburg, Westpreussen,
im Juli 1897.

Dr. **A. Himstedt.**

INHALTS-ÜBERSICHT.

Erster Teil.

Kapitel I: *Reibungselektrizität.*

Vorlesung:		Seite
1.	Elektrische Anziehung und Abstossung	1
2.	Elektroskope	15
3	Elektrisierung durch Influenz	24
4.	Leitung und Verteilung der Elektrizität	35
5.	Elektrisiermaschinen	48
6.	Die Leydener Flasche und andere Kondensatoren	69
7.	Weitere Quellen der Elektrizität	78

Kapitel II: *Magnetismus.*

8.	Magnetische Anziehung und Abstossung	90
9.	Methoden zur Herstellung von Magneten	101
10.	Verteilung des Magnetismus	108
11.	Gesetze der magnetischen Kraft	119
12.	Erdmagnetismus	135

Kapitel III: *Elektrische Ströme.*

13.	Einfache Volta'sche Elemente	145
14.	Chemische Vorgänge im Elemente	156
15.	Volta'sche Elemente	162
16.	Magnetische Wirkungen des Stromes	180
17.	Von den Galvanometern	193
18.	Von den durch Induktion erzeugten Strömen	209
19.	Chemische Wirkungen des Stromes	223
20.	Physikalische und physiologische Wirkungen des Stromes	234

Zweiter Teil.

Kapitel IV: *Elektrostatik.*

Vorlesung:		Seite
21.	Potentialtheorie	245
22.	Elektrometer	271
23.	Dielektrische Kapazität etc.	282
24.	Erscheinungen der Entladung	299
25.	Atmosphärische Elektrizität	323

Kapitel V: *Elektromagnetismus.*

26.	Magnetisches Potential	336
27.	Die elektromagnetischen Einheiten	356
28.	Eigenschaften des Eisens und Stahls	368
29.	Diamagnetismus	378
30.	Der magnetische Kreis	384
31.	Elektromagnete	390
32.	Elektrodynamik	400

Kapitel VI: *Von der Strommessung etc.*

33.	Das Ohm'sche Gesetz und seine Folgerungen	413
34.	Elektrische Messungen	428

Kapitel VII: *Thermoelektrizität.*

35.	Thermoelektrische Ströme	443

Kapitel VIII: *Wärme, Licht und Arbeit erzeugt durch elektrische Ströme.*

36.	Wärmewirkungen der Ströme	452
37.	Elektrische Energie: Zufuhr und Messung derselben	459
38.	Elektromotoren	466
39.	Das elektrische Licht	473

Kapitel IX: *Selbstinduktion.*

40.	Gegenseitige Induktion	483
41.	Selbstinduktion	488

Kapitel X: *Dynamomaschinen und Transformatoren.*

Vorlesung: Seite
42. Magnetelektrische und dynamoelektrische Maschinen 497
43. Wechselströme 508
44. Wechselstrom-Generatoren 517
45. Transformatoren 521
46. Wechselstrommotoren 525

Kapitel XI: *Elektrochemie.*

47. Elektrolyse 529
48. Akkumulatoren 539
49. Galvanoplastik 542

Kapitel XII: *Telegraphie.*

50. Elektrische Telegraphen 547
51. Kabel-Telegraphie 556
52. Verschiedene Telegraphen 559

Kapitel XIII: *Telephonie.*

53. Telephone 563

Kapitel XIV: *Elektrische Wellen.*

54. Oscillationen und Wellen 571
55. Elektromagnetische Theorie des Lichtes 575
56. Weitere Beziehungen zwischen Licht und Elektrizität 584

Anhang.

Ueber Röntgen-Strahlen 591
Namen- und Sachregister 593

ERSTER TEIL.

KAPITEL I.

REIBUNGSELEKTRIZITÄT.

I. VORLESUNG: *Elektrische Anziehung und Abstossung.*

1. Elektrizität. — Mit dem Namen *Elektrizität* bezeichnet man ein unsichtbares Agens, welches wir nur aus seinen Wirkungen kennen lernen können, sowie aus einer Reihe von Erscheinungen, die wir unter dem Namen *elektrische* zusammenfassen. Diese früher unverständlichen, ja geheimnissvollen Erscheinungen lassen sich heutzutage genau erklären, obgleich wir über die wahre Natur der Elektrizität selbst auch jetzt noch wenig wissen. Dieselbe ist weder Stoff noch Energie, und doch kann sie augenscheinlich mit dem Stoff in Verbindung gebracht werden, und wir können sie durch Aufwand von Energie in Bewegung setzen. In der That ist ihre grosse praktische Bedeutung auf den Umstand zurückzuführen, dass wir diejenige Energie, welche wir zur Erregung von Elektrizität an irgend einer Stelle eines Systems verwandt haben, an einer beliebigen andern Stelle desselben als elektrisches Licht, als elektrische Wärme oder Arbeit wieder auftreten lassen können, und zwar kann eine derartige Kraftübertragung auf sehr grosse Entfernungen stattfinden, wobei die Fortpflanzungsgeschwindigkeit eine ungeheuer grosse ist. Die Elektrizität ist offenbar ebenso unzerstörbar, wie Stoff und Energie; sie kann weder von selbst entstehen noch vernichtet werden, aber sie lässt sich in Bezug

auf Stoff und Energie umwandeln und kann von einem Orte zum andern fortbewegt werden. In mancher Beziehung verhält sie sich ähnlich wie eine inkompressibele Flüssigkeit, in anderer wie ein stark verdünntes, gewichtsloses Gas. Sie scheint fast gleichmässig über den ganzen Raum verteilt zu sein. Viele Schriftsteller (darunter der Verfasser) sind geneigt, sie mit dem Lichtäther zu identifizieren; jedenfalls existiert zwischen beiden, falls sie nicht dasselbe sind, eine enge Beziehung. Das ist eine notwendige Folgerung der grossen Maxwell'schen Entdeckung, dass das Licht selbst eine elektrische Erscheinung ist, und dass Lichtwellen gleichbedeutend mit elektrischen oder — nach der Maxwell'schen Ausdrucksweise — mit elektromagnetischen Wellen sind.

Den Namen *Elektrizität* gebraucht man auch zur Bezeichnung derjenigen Wissenschaft, welche von den elektrischen Erscheinungen und Theorieen handelt. Diese Erscheinungen lassen sich in vierfacher Beziehung betrachten. Befindet sich die Elektrizität in Ruhe, so sind die elektrischen Vorgänge anderer Art, als wenn die Elektrizität in Bewegung ist oder fliesst. Daher haben wir gesondert zu betrachten 1. die Gesetze statischer *Ladungen* und 2. die der elektrischen *Ströme.* Ferner zeigt die im geschlossenen Kreise strömende Elektrizität gewisse Eigenschaften, welche unabhängig entdeckt und mit dem Namen 3. *Magnetismus* bezeichnet worden sind. Endlich lässt die im Zustande schneller Vibration befindliche Elektrizität neue, bei den drei andern Zuständen nicht auftretende Eigenschaften erkennen: sie veranlasst 4. die Fortpflanzung der *Wellen.* Diese vier Abschnitte der Elektrizitätslehre sind jedoch eng mit einander verwandt. Der Zweck des vorliegenden Buches ist der, dem Leser eine allgemeine Übersicht der hauptsächlichsten Thatsachen und ihrer einfachen Beziehungen zu einander zu geben.

In den ersten Vorlesungen beschäftigen wir uns mit den elektrischen Ladungen, ihrer Erzeugungsweise durch Reibung, Influenz und verschiedene andere Methoden, und untersuchen dieselben hauptsächlich mit Hilfe der durch sie veranlassten

Anziehung und Abstossung. Darauf gehen wir zur Lehre vom Magnetismus und zu den elektrischen Strömen über und untersuchen die zwischen ihnen bestehenden Beziehungen. Am Schlusse geben wir eine kurze Erörterung über elektrische Wellen.

2. Elektrische Anziehung. Wenn man ein Stück Siegellack, Harz oder einen Glasstab mit einem wollenen oder seidenen Lappen reibt, so findet man, dass dieselben eine Eigenschaft bekommen haben, welche sie früher nicht hatten: nämlich die Fähigkeit, leichte Körper, wie Häcksel, Staubteilchen oder Papierschnitzel anzuziehen. Diese merkwürdige Eigenschaft wurde zuerst an dem Bernstein (griechisch ἤλεκτρον) beobachtet, und wird erwähnt von Thales von Milet (600 v. Chr.), sowie von Theophrast in seiner Abhandlung über Edelsteine, welche nach der Reibung leichte Körper anziehen. Obgleich sehr viele Körper diese Eigenschaft besitzen, waren doch Bernstein und Gagat die beiden einzigen, an denen die Alten dieselbe erkannt hatten, und bis zu dem Zeitalter der Königin Elisabeth von England ist kein Fortschritt auf diesem Gebiete zu verzeichnen. Erst um das Jahr 1600 fand Dr. Gilbert in Colchester bei seinen Versuchen, dass nicht allein Bernstein und Gagat jene Eigenschaft besitzen, sondern noch eine grosse Zahl anderer Körper, wie z. B. Diamant, Saphir, Bergkrystall, Glas, Schwefel, Siegellack, Harz etc., welche er deshalb *elektrische Körper* nannte[1]). Seit jener Zeit gebraucht man allgemein für jenes Agens, welches die erwähnten Erscheinungen hervorruft, das Wort **Elektrizität**[2]). Gilbert bemerkte ferner noch, dass die Versuche bei vorhandener Feuchtigkeit misslingen.

3. Eine bessere Methode, jene anziehende Kraft zu beobachten, besteht darin, dass man eine kleine Hollundermark- oder

---

1) »Electrica quae attrahunt eadem ratione ut electrum.« — Gilbert.

2) Das erste Werk, welches diesen Namen gebraucht, ist das des Robert Boyle: Über die mechanische Erregung der Elektrizität. Oxford 1675.

Korkkugel mittelst eines dünnen Fadens an einem Stativ befestigt, wie es Fig. 1 zeigt. Wenn man alsdann eine trockene, warme Glasröhre durch starkes Reiben mit einem seidenen Tuche erregt, so wird dieselbe die Hollundermarkkugel kräftig anziehen, ein Beweis, dass sie in hohem Grade elektrisiert ist. Als geeignetstes Reibzeug für ein Stück Siegellack erweist sich Flannell, Wolle oder, am besten von allen, Pelzwerk. Boyle fand, dass ein elektrisierter Körper selbst wieder von einem zweiten nicht elektrisierten angezogen wird. Dies lässt sich in folgender Weise darthun (siehe Fig. 2): man hängt eine geriebene Siegellackstange oder einen geriebenen Glasstab in einer Drahtschlinge an dem einen Ende eines *seidenen* Fadens auf; streckt man dann nach dem aufgehängten elektrisierten Körper die Hand aus, so wird derselbe sich drehen und der Hand sich nähern. Ebenso wird man finden, wenn ein seidenes Band mit erwärmtem Kautschuk gerieben oder auch nur zwischen zwei erwärmten Flanelllappen hindurchgezogen wird, und man es dann an dem einen Ende fasst, dass sein anderes Ende von in die Nähe gebrachten Gegenständen angezogen wird. Bringt man das Band in die Nähe der Zimmerwand, so wird es gegen dieselbe fliegen und dort haften bleiben. Bei geeigneten Vorsichtsmassregeln lässt sich zeigen, dass sowohl das Reibzeug als auch der geriebene Körper sich im elektrischen Zustande befinden, denn beide werden leichte Körper anziehen; um dies nachzuweisen, muss man sich aber

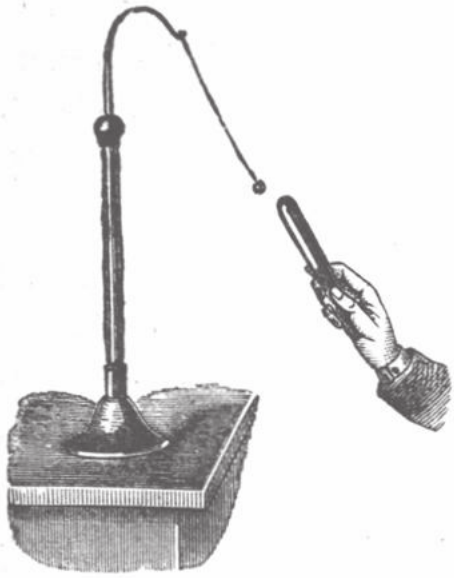


Fig. 1.

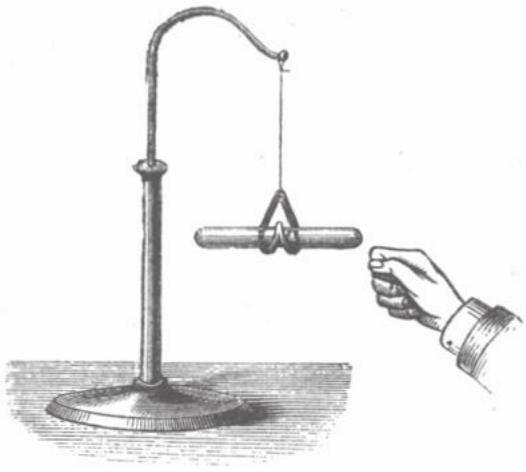


Fig. 2.

in acht nehmen, das Reibzeug nicht zu viel zu berühren. Will man zeigen, dass in dem Falle, wo eine Siegellackstange mit einem Stück Kaninchenfell gerieben wird, letzteres ebenfalls elektrisch wird, so thut man gut, das Fell nicht mit der Hand anzufassen, sondern es an das eine Ende eines gläsernen Handgriffes zu binden. Der Grund dieser Vorsichtsmassregel soll am Ende dieser und ausführlicher in der vierten Vorlesung angegeben werden.

Viele Körper, so insbesondere Eisen, Gold, Messing und alle Metalle zeigen, wenn man sie mit der Hand anfasst und dann reibt, keine Spur von Elektrizität, d. h. sie ziehen leichte Körper nicht an, wie dies geriebener Bernstein oder geriebenes Glas thun. Gilbert führt auch noch Perlen, Marmor, Achat und Magnetstein unter denjenigen Körpern auf, welche durch Reiben nicht elektrisch erregt werden. Solche Körper nannte man deshalb früher *anelektrisch.* Diese Bezeichnung ist aber falsch, denn wenn man solche an gläsernen Handgriffen befestigt und dann mit Seide oder Pelz reibt, so verhalten sie sich wie die elektrischen Körper.

4. Elektrische Abstossung. Experimentiert man mit einem geriebenen Glasstabe und Papier- oder Strohschnitzeln oder Kleie, so wird man finden, dass letztere zuerst angezogen und gegen den elektrisierten Stab fliegen, dann aber nach der Berührung mit diesem sogleich wieder abgestossen werden und auf den Tisch zurückfallen. Um diese Abstossung besser zu zeigen, hänge man eine kleine Feder oder Dune mittelst eines seidenen Fadens an einem Stativ (Fig. 3) auf und bringe einen elektrisierten Glasstab in die Nähe. Die Feder wird dann gegen den Stab fliegen und daran haften bleiben, um im nächsten Augenblicke durch

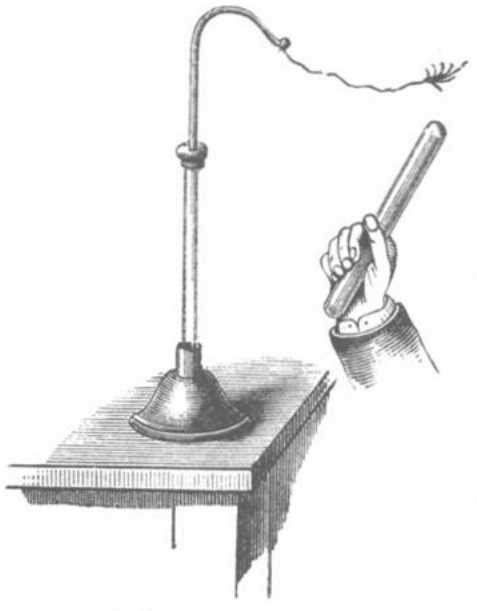


Fig. 3.

eine unsichtbare Kraft wieder abgestossen zu werden; sie wird nun nicht wieder vom Glasstabe angezogen. Wenn man aber jetzt die Hand der Feder nähert, so wird sie gegen diese fliegen, wie der geriebene Körper in Fig. 2; ein Beweis, dass die Feder, obgleich sie nicht selbst gerieben wurde, doch dieselbe Eigenschaft besitzt, welche ursprünglich dem Stabe durch Reiben mitgeteilt wurde. In der That ist die Feder elektrisch geworden durch die Berührung mit einem elektrisierten Körper, welcher einen Teil seiner Elektrizität an sie abgegeben hat. Aus diesem Versuche kann man aber noch einen weiteren Schluss ziehen, nämlich den, dass zwei mit derselben Elektrizität geladene Körper sich gegenseitig abstossen. Die Richtigkeit dieses Satzes lässt sich in folgender Weise zeigen. Hängt man einen geriebenen Glasstab wie in Fig. 2 auf, so wird derselbe von einem zweiten geriebenen Glasstabe abgestossen, ebenso wird eine geriebene Siegellackstange von einer zweiten geriebenen Siegellackstange abgestossen. Eine andere Methode, um die gegenseitige Abstossung zweier in gleicher Weise elektrisierten Körper zu zeigen, besteht darin, dass man zwei kleine Hollundermarkkugeln mittelst dünner Seidenfäden an ein gläsernes Stativ hängt, wie in Fig. 4, und beide mit demselben geriebenen Glasstabe berührt. Sie stossen sich dann gegenseitig ab und fliegen auseinander, anstatt, wie vorher, schlaff neben einander zu hängen. Je mehr man ihnen den Glasstab nähert, desto weiter entfernen sie sich von einander, denn jetzt übt derselbe auf beide eine abstossende Kraft aus. Die Abstossung, welche zwischen den einzelnen Teilen eines elektrisierten Körpers selbst statt findet, lässt sich sehr schön durch den Versuch mit einer elektrisierten Seifenblase zeigen: dieselbe dehnt sich nach dem Elektrisieren aus.

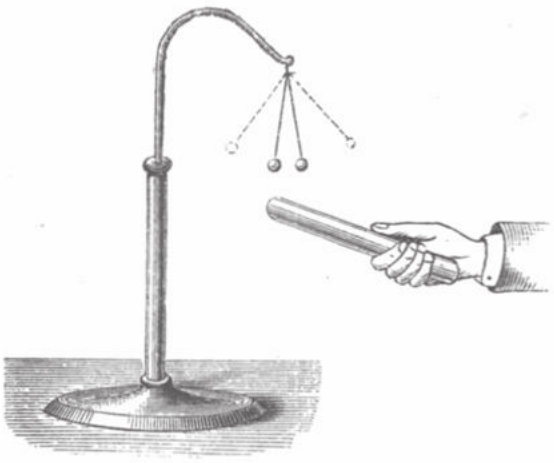


Fig. 4.

5. Zwei verschiedene Arten der Elektrizität. Elektrisierte Körper stossen sich jedoch nicht immer ab. Die Feder, welche (Fig. 3) mit einem geriebenen Glasstabe in Berührung gebracht und in Folge hiervon von demselben abgestossen wurde, wird angezogen, wenn man ihr eine geriebene Siegellackstange nähert; und umgekehrt, wenn die Feder zuerst durch Berührung mit der geriebenen Siegellackstange elektrisiert wurde, so wird sie von einem geriebenen Glasstabe angezogen und von dem geriebenen Siegellack abgestossen. In gleicher Weise wird ein geriebener Glasstab, den man wie in Fig. 2 aufgehängt hat, angezogen von einer geriebenen Siegellackstange oder einem Stück Harz oder Bernstein, abgestossen dagegen von einem geriebenen Glasstabe. Wenn man die beiden Hollundermarkkugeln, wie in Fig. 4, mit einem geriebenen Glasstabe berührt, so entfernen sie sich von einander in Folge der Abstossung, und, wie wir gesehen haben, um so mehr, je näher man ihnen den elektrisierten Glasstab bringt; dagegen nähern sie sich wieder gegenseitig, sobald man eine geriebene Siegellackstange unter sie hält, da sie von derselben angezogen werden. Diese und ähnliche Vorgänge wurden zuerst von Symmer beobachtet, und unabhängig von ihm, durch Du Fay entdeckt, welcher zu ihrer Erklärung zwei verschiedene Arten von Elektrizität annahm, wovon sich die eine gegenseitig anziehen, während die andere sich selbst abstossen sollte. Er nannte diejenige Elektrizität, welche auf dem Glase durch Reiben mit Seide erregt wurde, Glaselektrizität, da er, allerdings fälschlich, annahm, dass Glas keine andere Art liefern könne, und diejenige Elektrizität, welche er in Körpern, wie Siegellack, Harz, Schellack, Kautschuk und Bernstein durch Reiben mit Wolle oder Flanell erregte, bezeichnete er als Harzelektrizität. Es stellte sich jedoch heraus, dass die Art der erregten Elektrizität nicht allein von dem geriebenen Gegenstande, sondern auch von dem Reibzeuge abhängt. Denn Glas liefert Harzelektrizität, wenn man es mit einem Katzenfell reibt; und Harz liefert Glaselektrizität beim Reiben mit einem Lederkissen, das mit einem weichen Amalgam

aus Zinn und Quecksilber überzogen ist. Deshalb hat man diese Namen fallen lassen zu Gunsten der passenderen Bezeichnungen Franklin's, welcher die im Glase durch Reiben mit Seide erregte Elektrizität, die *positive* Elektrizität und die in harzhaltigen Körpern durch Reiben mit Wolle oder Pelz erregte, die *negative* Elektrizität nannte. Die Beobachtung Symmer's und Du Fay's lassen sich daher folgendermassen aussprechen: Zwei positiv elektrisierte Körper stossen einander ab; zwei negativ elektrisierte Körper stossen einander ab; aber ein positiv elektrisierter Körper und ein negativ elektrisierter ziehen einander an. Diese Wirkungen, welche eine Abstossung oder Anziehung zweier durch einen Zwischenraum getrennter Körper zu sein scheinen, sind in Wirklichkeit, wie jetzt feststeht, auf Vorgänge zurückzuführen, welche *in dem Medium* zwischen den Körpern vor sich gehen. Die positive Ladung übt auf die in ihrer Nähe befindliche negative Ladung thatsächlich keine anziehende Kraft aus, sondern beide werden durch Spannungen in dem umgebenden Medium gegen einander getrieben.

6. Gleichzeitige Erregung beider elektrischen Zustände. Keine Art der Elektrizität wird allein erregt; immer wird eine gleiche Quantität beider Arten erregt, und zwar tritt die eine Art an dem geriebenen Gegenstande auf, die andere in genau gleicher Menge an dem Reibzeuge. Dass diese Quantitäten gleich sind, kann in einigen Fällen klar bewiesen werden. Denn wenn man beide, sowohl die — (negative) Elektrizität des Reibzeuges wie die + (positive) Elektrizität des geriebenen Körpers einem dritten Körper mitteilt, so wird dieser *keine Elektrizität zeigen;* die beiden gleichen und entgegengesetzten Elektrizitäten werden einander genau neutralisieren. Dies zeigt der folgende einfache Versuch: Man reibe eine Siegellackscheibe an einer mit Flanell überzogenen Scheibe, indem man beide an isolierenden Handgriffen anfasst. Um den elektrischen Zustand derselben zu prüfen, benutze man ein isoliertes Metallgefäss und ein Elektroskop (vergl. Fig. 11). Wird nur eine der Scheiben in das Gefäss gebracht, so divergieren die Blättchen

des Elektroskops; werden dagegen gleichzeitig beide Scheiben in die Flasche geführt, so divergieren die Blättchen nicht, ein Beweis, dass die Ladungen der beiden Scheiben entgegengesetzt gleich sind.

Nachstehend aufgeführte Körper sind so geordnet, dass, wenn zwei von ihnen zusammen gerieben werden, der vorangehende + und der nachfolgende — elektrisch wird: *Pelz, Wolle, Elfenbein, Glas, Seide, Metalle, Schwefel, Kautschuk, Guttapercha, Kollodium oder Celluloid.*

7. **Theorieen der Elektrizität.** Man hat verschiedene Theorieen in Vorschlag gebracht, um die vorstehend beschriebenen Erscheinungen zu erklären, aber alle sind mehr oder weniger unzureichend. Symmer schlug eine **„Zwei-Fluida"-Theorie** vor, nach welcher man zwei unwägbare elektrische Fluida von entgegengesetzter Art unterscheidet, welche sich bei ihrer Vereinigung gegenseitig neutralisieren, und welche in allen Körpern in gleichen Mengen vereint auftreten, so lange, bis ihr Zustand durch Reiben geändert wird. Eine Modifikation dieser Theorie wurde von Franklin gegeben, welcher eine **„Ein-Fluidum"-Theorie** vorschlug. Nach dieser ist ein einziges elektrisches Fluidum im gewöhnlichen Zustande der Körper gleichmässig in ihnen verteilt und dieses verteilt sich, wenn sie gerieben werden, in ungleicher Weise zwischen dem Reibzeuge und dem geriebenen Körper, so dass dann der eine mehr, der andere weniger von dem Fluidum enthält, als den Durchschnittsbetrag. Aus dieser Vorstellung stammen die Ausdrücke positive (+) und negative (—) Elektrizität, welche man bis heutzutage beibehalten hat; der Körper, von welchem man annimmt, er habe einen Ueberschuss, ist mit + Elektrizität geladen, während der Körper, von welchem man annimmt, er habe weniger, mit — Elektrizität geladen ist. Diese Bezeichnungen sind jedoch ganz willkürlich, denn bei dem jetzigen Stande der Wissenschaft wissen wir nicht, in welchem von diesen beiden Zuständen ein Körper mehr Elektrizität, in welchem er weniger besitzt. In mancher Beziehung verhält sich die Elektrizität wie eine gewichtslose Substanz, die

ebenso inkompressibel ist wie eine wirkliche Flüssigkeit. Soviel steht jedoch ganz fest, dass *die Elektrizität kein materielles Fluidum ist,* was sie nun sonst auch sein möge. Einem Fluidum gleicht sie nur in so fern, als sie dem Anschein nach von einer Stelle zu einer andern fliesst, unterscheidet sich aber von jedem bekannten Fluidum in fast allen andern Beziehungen. Z. B. hat sie kein Gewicht und stösst sich selbst ab. Ueberdies ist es ganz unmöglich, zwei Fluida zu denken, deren Eigenschaften in jeder Beziehung das gerade Gegenteil von einander sein sollten. Deshalb führt es zu offenbaren Irrtümern, wenn man von einem elektrischen Fluidum oder von 2 Fluidis spricht, so bequem die Bezeichnung auch zu sein scheint. In Metallen und andern guten Leitern kann die Elektrizität sich scheinbar fortpflanzen und leicht in *Strömen* weiter fliessen. In durchsichtigen festen Körpern, wie Glas und Harz, in vielen durchsichtigen Flüssigkeiten, z. B. in Ölen, und in Gasen, wie die atmosphärische Luft (falls dieselbe ruhig und nicht verdünnt ist), kann die Elektrizität sich scheinbar nicht ausbreiten. Selbst ein Vakuum scheint ein Nichtleiter zu sein. In allen Nichtleitern kann die Elektrizität nur durch eine sogenannte elektrische *Verschiebung* (vergl. Art. 57) sich ausbreiten.

Es scheint demnach, dass die Elektrizität in Metallen leicht von Molekül zu Molekül übergehen kann, dass dieselbe dagegen bei Nichtleitern gewissermassen den Molekülen anhaftet oder mit ihnen verbunden ist. Einige Elektriker, besonders Faraday, haben eine **Molekulartheorie** der Elektrizität vorgeschlagen, nach welcher die elektrischen Zustände das Resultat gewisser besonderer Zustände der Moleküle der geriebenen Körper sind. Nach einer andern Ansicht steht der elektrische Zustand mit dem Aether in Beziehung (dem Medium, welches den ganzen Raum erfüllt und durch welches sich das Licht fortpflanzt), welcher, wie man weiss, die Moleküle der Körper umgiebt. Einige Schriftsteller sind in der That der Ansicht, dass der Aether selbst Elektrizität ist, und dass die beiden Zustände positiver und negativer Elektrisierung einfach die Folge einer Verschiebung des Aethers an

den Oberflächen der Körper sind. In diesen Vorlesungen werden wir so weit als thunlich alle Theorieen vermeiden und uns damit begnügen, nur das Wort **Elektrizität** zu gebrauchen.

8. Ladung. Die Elektrizitätsmenge, sei sie von der einen oder andern Art, welche durch Reiben oder andere Mittel an der Oberfläche eines Körpers erregt ist, wird als **Ladung** und ein elektrisierter Körper als *geladen* bezeichnet. Natürlich hat man sowohl Ladungen von verschiedener Grösse oder Stärke, wie Ladungen von verschiedener Art zu unterscheiden. Wenn die elektrische Ladung einem geladenen Körper entzogen wird, so sagt man, derselbe sei *entladen*. Gute Leiter der Elektrizität werden augenblicklich entladen, wenn man sie mit der Hand oder irgend einem andern mit dem Erdboden in Verbindung stehenden Leiter berührt, indem die Ladung in diesem Falle in die Erde entweichen kann. Einen Körper, welcher kein guter Leiter ist, kann man schnell entladen, wenn man ihn durch die Flamme einer Spirituslampe oder Kerze zieht, da die heissen Gase sofort die Elektrizität wegführen und sie in die Luft zerstreuen.

Die Elektrizität kann entweder auf der Oberfläche der Körper als *Ladung* haften, oder durch ihr Inneres als *Strom* fliessen. Der Teil der Wissenschaft, welcher von den Gesetzen der Ladungen an der Oberfläche der Körper, also von der in Ruhe befindlichen Elektrizität handelt, heisst **Elektrostatik** und wird im 4ten Kapitel behandelt. Derjenige Teil, welcher von den Strömen der Elektrizität handelt, findet sich im dritten Kapitel und noch an andern Stellen dieses Buches.

9. Methoden, den elektrischen Zustand darzustellen. Man bedient sich verschiedener Methoden, um den elektrischen Zustand der Körper darzustellen. In Fig. 5, 6 und 7 sind zwei Scheiben gezeichnet — *A* ist eine mit Wolle überzogene Scheibe, *B*

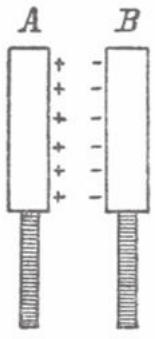


Fig. 5.

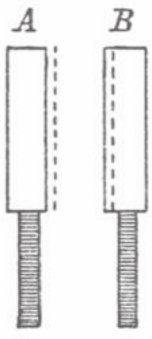


Fig. 6.

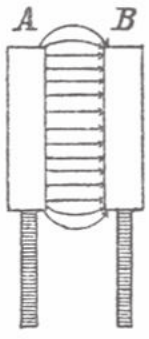


Fig. 7.

eine Harzscheibe — welche an einander gerieben sein mögen, so dass *A* positiv und *B* negativ elektrisch geworden ist. In Fig. 5 sind die Flächen mit + und — Zeichen versehen. In Fig. 6 sind punktierte Linien gezogen, und zwar ausserhalb der + elektrischen und innerhalb der — elektrischen Fläche, als wenn erstere einen Ueberschuss, letztere einen Mangel an Elektrizität aufwiese. In Fig. 7 sind zwischen beiden Scheiben Linien gezogen, welche von der + elektrischen Scheibe zu der benachbarten — Ladung führen. Die Vorzüge dieser letztern Darstellungsart sollen im 13. Artikel erläutert werden.

10. Konduktoren und Isolatoren. Den oben gebrauchten Ausdruck Leiter (Konduktor) wendet man auf diejenigen Körper an, welche die Elektrizität schnell durch sich durchfliessen lassen. Man kann im allgemeinen die Körper in 2 Klassen einteilen: In solche, welche die Elektrizität leiten, und in solche, welche sie nicht leiten. Allerdings gibt es viele Körper, von denen man streng genommen weder sagen kann, sie leiten die Elektrizität, noch auch, sie leiten sie nicht, und die deshalb nicht gut in eine jener beiden Klassen gebracht werden können. Alle Metalle leiten gut, der menschliche Körper leitet, und ebenso Wasser. Andererseits gehören Glas, Siegellack, Seide, Schellack, Guttapercha, Kautschuk, Harz, im allgemeinen alle fettigen Substanzen und die Luft zu den **Nichtleitern**. Daher gebraucht man einen Teil dieser Körper dazu, um aus ihnen Stative und Handgriffe für elektrische Apparate zu verfertigen, wenn es darauf ankommt, die Elektrizität nicht entweichen zu lassen. Aus diesem Grunde nennt man sie auch **Isolatoren**. Faraday nannte sie **dielektrische** Körper. Wir haben oben bemerkt, dass man diejenigen Körper *nicht-elektrisch* nennt, welche, wie die Metalle, keine Spur von Elektrizität zeigen, wenn man sie in der Hand hält und reibt. Wir kennen jetzt den Grund, weshalb sie keine Elektrizität zeigen; denn da sie gute Leiter sind, so fliesst die Elektrizität ebenso schnell weg, wie sie erzeugt wird. Die Beobachtung Gilbert's, dass elektrische Versuche bei feuchtem Wetter misslingen, lässt sich ebenfalls erklären, wenn man weiss,

dass das Wasser zu den Leitern gehört; die Feuchtigkeitsschicht nämlich, welche die Oberfläche der Körper bei feuchtem Wetter überzieht, lässt die durch Reibung erregte Elektrizität ebenso schnell wieder entweichen wie sie erzeugt wurde.

11. Weitere elektrische Erscheinungen. Die Erregung der Elektrizität durch Reibung wird ausser durch die Anziehung und Abstossung, welche wir bisher als Beweis für das Vorhandensein der Elektrizität hingestellt haben, noch durch andere Erscheinungen erwiesen. Otto von Guericke bemerkte zuerst, dass man von stark elektrisierten Körpern im Augenblicke ihrer Entladung Lichtfunken und Lichtblitze erhalten kann. Solche Funken werden, wie Newton und andere Forscher schon bemerkten, gewöhnlich von einem Knistern begleitet, welches im Kleinen an den den Blitz begleitenden Donner erinnert. Matte Lichtblitze erhält man auch bei der Entladung der Elektrizität durch zum Teil luftleer gepumpte Röhren. Andere Wirkungen sollen in geeigneter Folge erwähnt werden.

12. Weitere Quellen der Elektrizität. *Reibung* ist keineswegs die einzige Quelle der Elektrizität. Die übrigen Quellen, Stoss, Kompression, Wärme, chemische und physiologische Prozesse, metallische Berührung etc. sollen in der 7. Vorlesung behandelt werden. Hier wollen wir nur bemerken, dass Reibung zweier verschiedener Körper, gleichviel welcher, *stets* eine elektrische Scheidung bewirkt. Symmer beobachtete Elektrizitätserregung, als ein seidener Strumpf über einen wollenen gezogen wurde, obschon Wolle an Wolle gerieben, oder Seide an Seide keine elektrische Wirkung hervorbringt. Wenn man aber rauhes Glas an glattem Glase reibt, so bemerkt man Elektrizitätserregung, und in der That spielt auch die Beschaffenheit der Oberfläche eine sehr wichtige Rolle bei der Erregung von Reibungselektrizität. Im allgemeinen wird von zwei an einander geriebenen Körpern derjenige negativ elektrisch, dessen Teilchen bei der Reibung am leichtesten verschoben werden können. Temperaturunterschiede üben ebenfalls einen Einfluss auf die elektrische Beschaffenheit eines Körpers aus; ein warmer Körper

wird gewöhnlich negativ elektrisch, wenn man ihn an einem kalten Stücke derselben Substanz reibt. Die Menge der erregten Elektrizität ist jedoch dem Aufwande an wirklicher mechanischer Reibung nicht proportional, und deshalb scheint es zweifelhaft zu sein, ob die Reibung die wahre Ursache der Elektrizitätserregung ist. Irgend ein Vorgang findet ohne Zweifel statt, wenn man die Oberflächen zweier verschiedener Substanzen zur innigen Berührung bringt, und dies hat zur Folge, dass sie nach ihrer Trennung entgegengesetzt elektrische Ladungen aufweisen, indem der eine Körper vom andern offenbar einen Teil der Elektrizität erhalten hat (vorausgesetzt ist dabei, dass wenigstens einer der Körper ein Isolator ist.) Allein diese entgegengesetzten Ladungen ziehen einander an und können nicht von einander getrennt werden, ohne dass mechanische Arbeit an dem Systeme verrichtet wird. Die auf diese Weise verbrauchte Arbeit wird bei der Trennung der Oberflächen aufgespeichert, und so lange die Ladungen von einander getrennt bleiben, repräsentieren sie einen Vorrat potentieller Energie. Die sogenannten Reibungselektrisiermaschinen sind daher solche Maschinen, welche ungleiche Substanzen zur innigen Berührung bringen und darauf die Teilchen, welche sich berührt haben und elektrisch geworden sind, wieder von einander trennen.

Falls die an einander geriebenen Körper beide Konduktoren sind, werden dieselben nur schwach elektrisch, selbst wenn man sie an isolierenden Handgriffen hält. Es ist höchst wahrscheinlich, dass die durch Reibung erzeugte Wärme, z. B. an den Achsenlagern der Maschinen, von elektrischen Strömen herrührt, welche dort entstehen, wo die Oberflächen sich berühren und wieder von einander abgleiten.

13. Elektrisches Feld. Jedes Mal, wenn zwei entgegengesetzt geladene Oberflächen einander nahe sind, zeigen sie das Bestreben, sich gegen einander zu bewegen, und der sie umgebende Raum gerät in einen eigentümlichen Zustand, als ob das dazwischen befindliche Medium gespannt worden wäre. Um den Raum zwischen zwei Körpern, von denen der eine

positiv und der andere negativ elektrisch ist, zu untersuchen, benutzen wir einen aus sehr dünnem Papier verfertigten Zeiger, durch welchen ein langes Glasstäbchen führt. (Fig. 8). Wir finden, dass dieser Zeiger sich längs unsichtbarer *elektrischer Kraftlinien* so zu stellen strebt, dass er von der + elektrischen Oberfläche quer nach der — elektrischen weist. Der mit elektrischen Kraftlinien erfüllte Raum heisst ein *elektrisches Feld.* In Fig. 7 repräsentieren *A* und *B* zwei Körper, deren Oberflächen elektrisch sind, und zwar die eine positiv, die andere negativ. In dem zwischen ihnen befindlichen Felde verlaufen die elektrischen Linien fast gerade, nur in der Nähe der Ecken sind dieselben gekrümmt. Die elektrischen Kraftlinien gehen von der + geladenen Oberfläche aus und endigen bei der — geladenen. Niemals laufen sie zusammen oder kreuzen sich. Ihre Richtung ist die der resultierenden elektrischen Kraft für jeden Punkt, durch welchen sie hindurchgehen. Die Kraft innerhalb des auf diese Weise mit Kraftlinien erfüllten Mediums wirkt gleich einer Spannung längs derselben, als ob sie das Bestreben hätten, sich zu verkürzen. In der That treibt die Spannung in dem Medium die beiden Oberflächen (Fig. 7) an einander. In dem Medium macht sich auch ein rechtwinklig zu den Kraftlinien gerichteter Druck bemerkbar, welcher ihren Abstand von einander zu vergrössern strebt. Fig. 9 stellt eine mit + Elektrizität geladene Kugel vor, welche sich in einiger Entfernung von andern Körpern befindet; hier sind die Kraftlinien des Felds einfach radial.

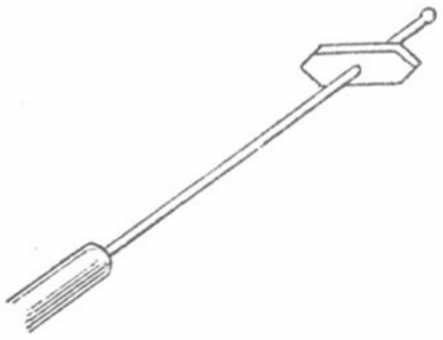


Fig. 8.

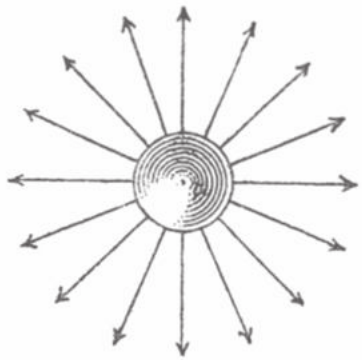


Fig. 9.

II. VORLESUNG: *Elektroskope.*

14. Einfache Elektroskope. Ein Instrument, welches

erkennen lässt, ob ein Körper elektrisch ist oder nicht, und ob die Elektrizität + oder — ist, heisst ein **Elektroskop.** Die Feder, welche angezogen oder abgestossen wurde, und die beiden Hollundermarkkugeln, welche auseinander gingen, wie wir in der ersten Vorlesung fanden, sind in der That einfache Elektroskope. Es gibt jedoch noch zahlreiche Apparate, die für diesen besondern Zweck geeigneter sind; und einige von ihnen sollen hier beschrieben werden.

15. Das Strohhalmelektroskop. Das erste Elektroskop wurde von Dr. Gilbert angegeben. Dasselbe besteht (Fig. 10)

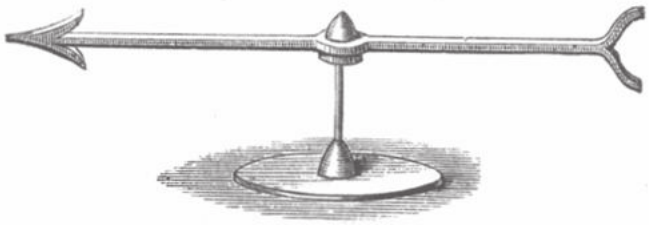


Fig. 10.

aus einem steifen Strohhalm, welcher leicht auf einer scharfen Spitze schwebt. Ein dünner Messing- oder Holzstreifen, oder auch ein Gänsefederkiel, auf einer Nähnadel schwebend, thun dieselben Dienste. Bringt man einen elektrisierten Körper in die Nähe des Elektroskopes, so dreht sich dasselbe und wird angezogen, und zeigt auf diese Weise noch Mengen von Elektrizität an, die viel zu klein sind, um Papierschnitzeln vom Tische anzuziehen.

16. Das Goldblattelektroskop. Ein noch empfindlicherer Apparat ist das **Goldblattelektroskop** (Fig. 11), welches von Bennet erfunden wurde. Wir haben gesehen, dass 2 Hollundermarkkugeln, welche mit derselben Elektrizität geladen sind, sich abstossen und von einander entfernen, wobei also die Schwerkraft zum Teil von der elektrischen Abstossung überwunden wird. Ebenso verhalten sich zwei schmale, an einer Stütze befestigte Streifen sehr dünnen Papiers, wenn man dieselben elektrisiert. Die besten Wirkungen erzielt man jedoch mit 2 Streifen Goldblatt, da dieses ausserordentlich dünn und deshalb noch viel leichter als das dünnste Papier ist. Behufs Anfertigung eines

Goldblattelektroskops hängt man zweckmässig die beiden Blätter innerhalb einer weithalsigen Glasflasche auf. Diese hat einen doppelten Zweck, einmal die Blättchen vor Luftzug zu schützen und zweitens sie vor der Berührung mit dem Erdboden zu bewahren. Durch den Kork, welchen man mit Schellack oder Paraffinwachs firnisst, führt man eine kleine ebenfalls gefirnisste Glasröhre, durch diese geht ein steifer Messingdraht, dessen unteres Ende man rechtwinklig so umbiegt, dass die beiden Goldblattstreifen dadurch gehalten werden. Das obere Ende

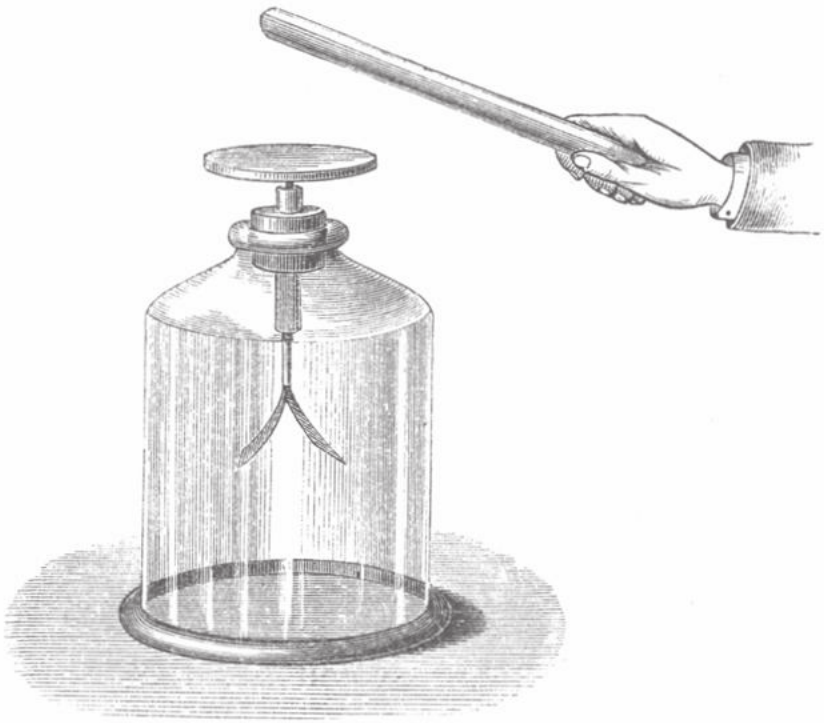


Fig. 11.

des Drahtes trägt eine kleine Metallplatte oder ist mit einem Messingknopfe versehen. Hält man das Elektroskop trocken und staubfrei, so zeigt es ausserordentlich kleine Mengen von Elektrizität an. Ein geriebener Glasstab wird noch in einer Entfernung von 2—3 Fuss von dem Apparate die gegenseitige Abstossung der Blätter bewirken. Wenn man einen Bleistift spitzt, und die Späne oben auf das Elektroskop fallen lässt, so bemerkt man, dass dieselben elektrisch sind. Ja wenn der Knopf nur mit einer Kameelhaarbürste gebürstet wird, so bringt die geringe Reibung eine merkliche Wirkung hervor. Mit Hilfe dieses Ap-

parates lässt sich zeigen, dass jede Art der Reibung Elektrizität erzeugt. Wenn Jemand auf einer isolierenden Unterlage steht, z. B. auf einem Schemel mit gläsernen Beinen oder auf einem über 4 Gläser gelegten Brette, und dann schnell mit einem seidenen Taschentuche oder mit einem Fuchsschwanze geschlagen wird oder auch nur mit einer Tuchbürste gebürstet wird, so wird er elektrisiert, was durch das Elektroskop angezeigt wird, sobald er die Hand auf den Knopf desselben legt. Das Goldblattelektroskop kann ferner dazu dienen, um die *Art* der Elektrizität eines elektrisierten Körpers anzuzeigen. Reibt man z. B. ein Stück Löschpapier mit Kautschuk, so kann man auf folgende Weise entscheiden, ob die Elektrizität des Papiers + oder — ist. Zunächst lade man die Goldblätter des Elektroskopes, indem man den Knopf mit einem an Seide geriebenen Glasstabe berührt. Die Blätter gehen auseinander, da sie jetzt beide mit + Elektrizität geladen sind. In diesem Zustande wird die Annäherung eines mit + Elektrizität geladenen Körpers die Blätter noch weiter auseinander streben lassen, während sie bei der Annäherung eines mit — Elektrizität geladenen Körpers zusammenfallen würden. Bringt man jetzt das Löschpapier in die Nähe des Elektroskopes, so findet man, dass die Blätter noch mehr divergieren, ein Beweis also, dass die Elektrizität des Papiers die nämliche ist wie diejenige, womit das Elektroskop geladen ist, also +. Bisweilen wird die Aussenseite der die Goldblätter enthaltenden Glasflasche mit dünnem Draht oder mit Foliestreifen überzogen, um die Blätter vor dem Einfluss ausserhalb befindlicher Körper zu schützen. Besser ist es, eine solche Glassorte zu verwenden, welche ein Konduktor ist.

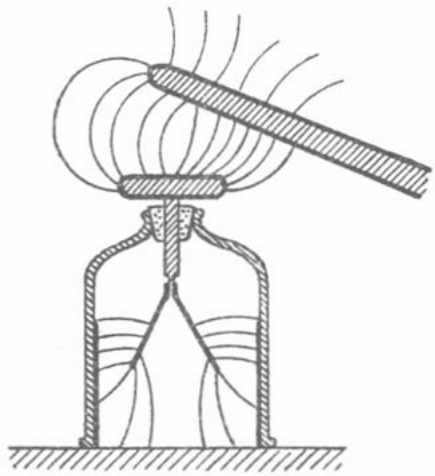


Fig. 12.

Das umgebende Medium ist bei dem Elektroskop wie folgt beteiligt (Fig. 12). Eine Anzahl der elektrischen Kraftlinien, welche das den

geriebenen Stab umgebende Feld erfüllen, führt in die Metallplatte des Elektroskops und tritt unten aus den Blättern heraus. Je mehr der Stab dem Elektroskop genähert wird, desto grösser ist die Anzahl der elektrischen Kraftlinien, welche auf den Apparat einwirken. Da eine Spannung längs der Kraftlinien und ein Druck rechtwinklig gegen dieselben ausgeübt wird, so gehen die Goldblätter auseinander, als wenn sie sich gegenseitig abstiessen.

Das Goldblattelektroskop zeigt auch den ungefähren Betrag der Elektrizität eines dasselbe berührenden Körpers an, denn die Goldblätter gehen um so mehr auseinander, je grösser die ihnen mitgeteilte Menge der Elektrizität ist. Will man jedoch eine vorhandene Elektrizitätsmenge genau messen, so muss man die unter dem Namen Elektrometer bekannten Instrumente zu Hilfe nehmen, welche in der 22. Vorlesung beschrieben werden sollen.

Bei einer andern Form des Elektroskopes (dem Bohnenberger'schen) hat man nur ein Goldblatt, welches zwischen 2 Metallplatten aufgehängt ist, von denen die eine +, die andre — elektrisch gemacht werden kann, indem man sie mit den Polen einer trockenen Säule (Art. 188) verbindet. Je nachdem das Goldblatt + oder — geladen wird, wird es von der einen oder andern Seite angezogen und von der gegenüberliegenden abgestossen, entsprechend dem in Art. 4 angegebenen Gesetze der Anziehung und Abstossung.

17. Henley's Quadrant-Elektroskop. Das Quadrant-Elektroskop wendet man bisweilen an, um grosse elektrische Ladungen anzuzeigen. Es besteht aus einer Hollundermarkkugel, welche am Ende eines leichten Hebelarms steckt, der durch eine Achse an einem geraden Ständer befestigt ist. Wird der ganze Apparat elektrisiert, so wird die Hollundermarkkugel von dem Ständer abgestossen und entfernt sich von demselben um einen Winkel, welcher auf einer dahinter befindlichen geteilten Skala oder einem Quadranten angezeigt wird. Fig. 13 zeigt die

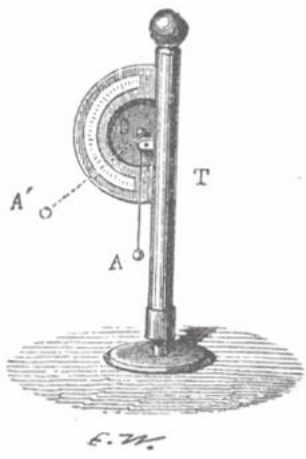


Fig. 13.

gewöhnliche Form des Apparates. Dieses kleine **Elektroskop**, welches meist nur gebraucht wird, um das Geladensein einer elektrischen Maschine oder einer Leydener Batterie zu zeigen, darf nicht mit dem in der 22. Vorlesung beschriebenen, empfindlichen Quadrant-Elektrometer verwechselt werden, dessen Aufgabe es ist, sehr kleine elektrische Ladungen zu *messen*, nicht aber grosse Ladungen *anzuzeigen*.

18. Die Torsionswage. Es erscheint zweckmässig, schon an dieser Stelle den unter dem Namen Torsionswage bekannten Apparat zu beschreiben, obgleich derselbe eigentlich mehr ein *Elektrometer*, als ein blosses *Elektroskop* ist (Fig. 14). Dieser einst berühmte, jetzt aber ganz veraltete Apparat dient dazu, die abstossende Kraft zwischen 2 mit derselben Elektrizität geladenen Körpern zu messen. Man hält dabei dieser abstossenden Kraft das Gleichgewicht durch eine zweite Kraft, die von einem feinen Drahte ausgeübt wird, der, wenn er gedrillt (tordiert) worden ist, in die Gleichgewichtslage zurückzukehren (sich zu detordieren) strebt. Die Torsionswage besteht aus einem leichten Hebelarme von Schellack, welcher innerhalb eines cylindrischen Glasgefässes an einem feinen Silberdrahte aufgehängt ist. An dem einen Ende dieses Hebels befindet sich eine vergoldete Hollundermarkkugel *n*. Das obere Ende des Silberdrahtes ist an einer Messingscheibe befestigt, auf welcher sich ein in Grade geteilter Kreis befindet. Diese Scheibe ist drehbar über der sie tragenden Röhre, und heisst die Torsionsscheibe. Durch eine Oeffnung im Deckel des Gefässes kann man in dasselbe eine zweite vergoldete Hollundermarkkugel *m* bringen, welche am Ende eines vertikalen Glasstabes *a* befestigt ist. Rings um das Glasgefäss ist in der Höhe der Hollundermarkkugeln ein Kreis gezogen, welcher ebenfalls

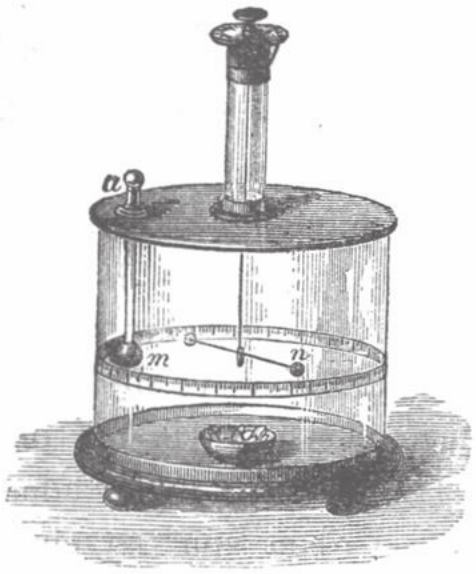


Fig. 14.

in Grade geteilt ist. Will man nun die Torsionswage dazu benutzen, die Grösse einer elektrischen Ladung zu messen, so kann man auf folgende Weise verfahren: Zuerst wird die Torsionsscheibe soweit gedreht, bis die beiden Hollundermarkkugeln *m* und *n* einander gerade berühren. Dann nimmt man den Glasstab *a* heraus und teilt die zu messende elektrische Ladung der Kugel *m* mit, welche darauf wieder in die Wage gebracht wird. Sobald *m* und *n* sich berühren, geht ein Teil der Ladung von *m* auf *n* über, und die Kugeln stossen sich gegenseitig ab, da sie nun mit derselben Elektrizität geladen sind. Deshalb wird die Kugel *n* im Kreise fortgetrieben und der Draht bis zu einem gewissen Betrage gedreht. Die abstossende Kraft wird aber um so geringer, je mehr sich *n* von *m* entfernt, während die Kraft des Drahtes wächst, je mehr derselbe gedreht wird. Daher werden sich diese beiden Kräfte einander das Gleichgewicht halten, wenn die Kugeln einen gewissen Abstand erreicht haben, und es ist klar, dass eine grosse elektrische Ladung die Kugel *n* mit einer stärkern Kraft abstösst, als eine kleine elektrische Ladung. Den Abstand, bis zu welchem die Kugel gestossen wird, liest man in Graden an der Skala ab. Wenn ein Draht gedreht wird, so ist die Kraft, mit welcher er in die Gleichgewichtslage zurückzukehren strebt, genau dem Betrage der Drehung proportional. Die Kraft, welche erforderlich ist, den Draht um 10 Grade zu drehen, ist gerade 10 mal so gross wie die Kraft, welche erforderlich ist den Draht um einen Grad zu drehen. Mit andern Worten: *Die Torsionskraft ist dem Torsionswinkel proportional.* Andererseits ist der durch Grade ausgedrückte Abstand der beiden Kugeln, falls sie nicht sehr weit von einander entfernt sind, ihrem geradlinigen Abstande nahezu proportional und drückt die Kraft aus, welche 2 elektrisierte Kugeln *in jener Entfernung* auf einander ausüben. Der Leser muss jedoch sorgfältig unterscheiden zwischen dem Messen der **Kraft** und dem Messen der wirklichen **Menge** der Elektrizität, mit welcher der Apparat geladen ist. Denn die Kraft, welche die elektrisierten Kugeln auf einander ausüben, ist bei verschiedenen Abständen

verschieden, zufolge eines besondern Gesetzes, welches das Gesetz vom umgekehrten quadratischen Verhältnis heisst und welches eine genaue Erklärung erheischt.

19. Gesetz vom umgekehrten quadratichen Verhältnis. Coulomb bewies mit Hilfe der Torsionswage, dass die Kraft, welche 2 kleine elektrisierte Körper auf einander ausüben, dem Quadrate ihrer Entfernung umgekehrt proportional ist. Wenn demnach 2 elektrisierte Körper in einer Entfernung von 1 Zentimeter sich mit einer bestimmten Kraft abstossen, so findet man, dass die Kraft in einer Entfernung von 2 Zentimetern nur den vierten Teil so gross ist, wie die Kraft für 1 Zentimeter Entfernung; und bei 10 Zentimetern wird sie nur den 100. Teil so gross sein, wie bei 1 Zentimeter. Dies Gesetz wird durch folgenden Versuch mit der Torsionswaage bewiesen. Die beiden Skalen (an der oberen Messingscheibe und am Glasgefässe) wurden auf 0° eingestellt und den Kugeln eine bestimmte Ladung mitgeteilt. Die Kugel *n* wurde hierdurch bis zu einem Abstande von 36° abgestossen. Die Drehung des Drahtes zwischen seinen beiden Enden betrug ebenfalls 36° oder anders ausgedrückt, die abstossende Kraft zwischen den elektrisierten Kugeln war 36 mal so gross, wie die Kraft, welche erforderlich gewesen wäre, den Draht um 1° zu drehen. Die Torsionsscheibe wurde hierauf so gedreht, dass die Torsion des Drahtes noch vergrössert wurde, dagegen die Kugel *n* sich der Kugel *m* näherte, und zwar wurde die Torsionsscheibe so lange gedreht, bis der Abstand zwischen *n* und *m* nur noch halb so gross war. Um den Abstand von 36° bis auf 18° zu vermindern, musste man die Torsionsscheibe um 126° drehen. Die totale Drehung zwischen den beiden Enden des Drahtes betrug also jetzt 126° + 18° = 144°; und die Kraft war mithin 144 mal so gross, wie die Kraft, welche den Draht um 1° gedreht haben würde. 144 ist aber 4 mal so gross, wie 36; daraus erkennt man, dass, während der Abstand auf die *Hälfte* reduziert worden war, die zwischen den Kugeln wirkende Kraft *4 mal* so gross geworden war. Hätte man den Abstand auf *den vierten Teil,* also auf 9° reduziert, so

hätte man als totale Drehung des Drahtes 576° gefunden; also *16 mal* so gross; ein Beweis, dass die Kraft **dem Quadrate der Entfernung umgekehrt proportional ist.**

Bei einem Versuche bedarf es einer grossen Erfahrung und Geschicklichkeit, um so genaue Resultate wie die vorstehenden zu erzielen, denn der Apparat gibt zu manchen Fehlern Veranlassung. Die Kugeln müssen im Vergleich zu ihrem gegenseitigen Abstande sehr klein sein. Ausserdem werden die elektrischen Ladungen nach und nach schwächer, als ob die Elektrizität in die Luft entwiche. Dieser Verlust wird geringer sein, falls der Apparat ganz trocken ist. Man hält daher das Innere desselben gewöhnlich dadurch trocken, dass man eine Schale mit Chlorcalcium oder Bimstein, der mit konzentrierter Schwefelsäure getränkt ist, in das Innere des Gefässes stellt, um die Feuchtigkeit aufzusaugen.

Bevor wir den Abschnitt über elektrische Kräfte verlassen, wird es gut sein hinzuzufügen, dass die *anziehende* Kraft zweier mit entgegengesetzten Elektrizitäten geladenen Körper ebenfalls dem Quadrate der Entfernung umgekehrt proportional ist. Und in jedem Falle, sei es Anziehung oder Abstossung, ist die Kraft in jeder beliebigen Entfernung dem **Produkte der beiden elektrischen Massen direkt proportional.** Wenn man z. B. einzeln der Kugel *m* die Ladung 2, und der Kugel *n* die Ladung 3 gegeben hätte, so würde die zwischen ihnen wirkende Kraft $3 \times 2 = 6$ mal so gross sein, als wenn jede Kugel die Ladung 1 erhalten hätte. Es muss jedoch noch erwähnt werden, dass das Gesetz vom umgekehrten quadratischen Verhältnis nur dann gilt, wenn die in Betracht kommenden Körper im Vergleich zu ihrem gegenseitigen Abstande so klein sind, dass sie als blosse Punkte gelten können. Für grosse platte oder längliche Körper gilt jenes Gesetz nicht. Die Anziehung zwischen zwei grossen platten Scheiben, welche einander gegenüberstehen und entgegengesetzt geladen sind, ist von ihrem Abstande unabhängig.

20. Feld zwischen zwei Kugeln. — Das elektrische Feld (Art. 13) zwischen zwei mit entgegengesetzten Elektrizitäten ge-

ladenen Kugeln (Fig. 15) ist mit krummen Linien erfüllt. Nach dem im Art. 13 Gesagten äussert sich längs dieser Linien eine Spannung, welche nicht allein die beiden Kugeln, sondern auch die auf ihren Oberflächen befindlichen Elektrizitäten an einander zu treiben strebt. Auch ist ein seitlicher Druck in dem Medium vorhanden, welcher die elektrischen Kraftlinien von einander fern hält. Diese Vorgänge haben zur Folge, dass die Ladungen nicht mehr gleichmässig über die Oberflächen verteilt, sondern an den zumeist genäherten Stellen am dichtesten sind.

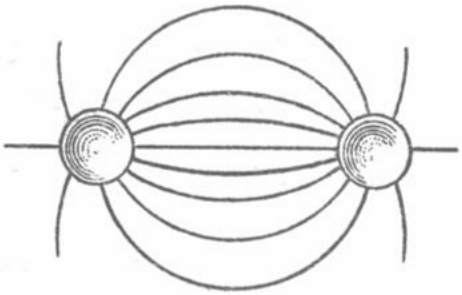


Fig. 15.

21. Elektrische Masseneinheit. Infolge dieser Gesetze über Anziehung und Abstossung hat man es sehr zweckmässig gefunden, für diejenige elektrische Masse, welche man als Einheit oder Mass nimmt, um andere elektrische Massen zu messen, die folgende Definition aufzustellen: *Die (elektrostatische) Einheit der Elektrizität ist diejenige Menge derselben, welche auf eine ihr gleiche Menge Elektrizität derselben Art bei einem gegenseitigen Abstande der beiden von 1 Zentimeter eine abstossende Kraft Eins ausübt.* Wenn ein anderes Medium wie Luft den Raum erfüllt, ist die Kraft eine andere. Benutzt man z. B. Petroleum, so ist die Kraft, welche zwei gegebene Ladungen auf einander ausüben, ungefähr nur halb so gross (vergl. Art. 56). Weitern Aufschluss über das Messen elektrischer Quantitäten findet man in der 21. und 22. Vorlesung.

III. VORLESUNG: *Elektrisierung durch Influenz.*

22. Influenz. Wir haben bisher gesehen, wie 2 geladene Körper sich anziehen oder abstossen können. Man hat bisweilen gesagt, dass es die in den Körpern vorhandenen Elektrizitäten seien, welche sich anziehen oder abstossen; doch da die Elektrizität bekanntlich nur in oder an materiellen Dingen existiert, so ist der Beweis, dass die Elektrizitäten selbst sich gegenseitig anziehen, nur ein indirekter. Trotzdem wird diese Ansicht von

gewissen Umständen unterstützt, unter andern von dem elektrischen Einflusse, welchen ein elektrisierter Körper auf einen nicht elektrisierten ausübt.

Angenommen, man mache die Kugel C (Fig. 16) positiv elektrisch und nähere sie dann einem unelektrischen Körper; was wird geschehen? Man nehme zu diesem Versuche den in Fig. 16 dargestellten Apparat, welcher aus einer langen, walzen-

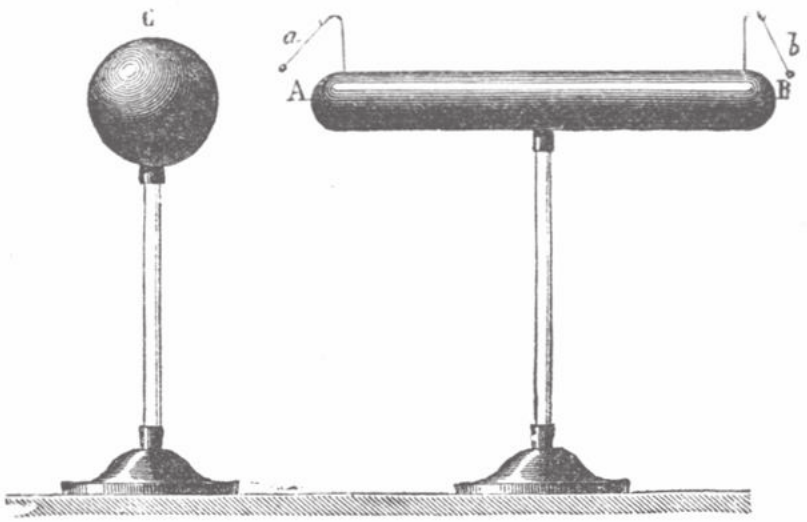


Fig. 16.

förmigen Metallröhre besteht, die hohl oder solid sein kann und auf einer gläsernen Stütze ruht. Dieser Konduktor (so genannt, weil er aus Metall besteht, welches der Elektrizität einen freien Durchgang durch sein Inneres oder über seine Oberfläche gestattet) ruht auf einer gläsernen Stütze, um das Entweichen der Elektrizität in den Erdboden zu verhüten; Glas gehört zu den Nicht-Leitern. Nun ergibt sich, dass die + Elektrizität der diesem Konduktor genäherten Kugel auf demselben Elektrizität *induziert*, und dass derselbe, obgleich er nicht gerieben wurde, an seinen beiden Enden sich wie ein elektrisierter Körper verhält. Die Enden des Konduktors ziehen kleine Papierstücke an, und Hollundermarkkugeln, welche man an die Enden des Konduktors anhängt, werden abgestossen. Dagegen findet man, dass der mittlere Teil des länglichen Konduktors keine Spur von Elektrizität zeigt. Eine weitere Untersuchung lässt ferner erkennen, dass die beiden Elektrizitäten an den Enden des Konduktors von entgegen-

gesetzter Art sind, und zwar befindet sich auf dem der + elektrisierten Glaskugel zugekehrten Ende A eine negative Ladung, und auf dem entgegengesetzten Ende B eine ebenso grosse positive Ladung. Daraus geht hervor, dass eine + Ladung negative Elektrizität anzieht und + abstösst, und dass diese Einwirkung auch noch in einer gewissen Entfernung von dem Körper statt hat. Wenn man mit einer — Ladung auf einem Stücke Siegellack begonnen hätte, so würde dieselbe auf dem genäherten Ende des Konduktors A positive, auf dem entgegengesetzten Ende B negative Elektrizität induziert haben. Diese Einwirkung, welche von John Canton im Jahre 1753 entdeckt wurde, heisst elektrische **Induktion** oder *Influenz*. Dieselbe findet noch bei einer beträchtlichen Entfernung statt. Selbst wenn man eine grosse Glasscheibe dazwischen stellt, hat man noch dieselbe Wirkung. Wird aber der elektrisierte Körper entfernt, so verschwinden beide Ladungen und lassen keine Spur zurück, und die Glaskugel enthält genau so viel Elektrizität wie vorher; sie hat nichts von ihrer eigenen Ladung verloren. Man wird sich erinnern, dass man nach der einen Theorie einen + geladenen Körper auffasst als einen solchen, der *mehr* Elektrizität als die Gegenstände in seiner Umgebung hat, während man einen — geladenen als einen Körper auffasst, der *weniger* Elektrizität enthält. Nach dieser Auffassungsweise muss man sagen: Wenn ein Körper, der, wie z. B. die + elektrisierte Glaskugel, mehr Elektrizität enthält, als die Gegenstände seiner Umgebung, in die Nähe eines isolierten Konduktors gebracht wird, so wird die gleichförmige Verteilung der Elektrizität auf jenem Konduktor gestört, indem die Elektrizität von dem dem + Körper nahen Ende wegfliessst, so dass dort weniger als für gewöhnlich zurückbleibt, während an dem andern Ende mehr als für gewöhnlich angesammelt wird. Diese Anschauungsweise erklärt das Verschwinden jeder Spur der Elektrizität in dem Augenblicke, wo der elektrisierte Körper entfernt wird, ohne weiteres, denn der Konduktor kehrt dann in seinen frühern Zustand zurück und zeigt weder +, noch — Elektrizität, indem er weder mehr, noch weniger elektrisch ist, als alle übrigen Gegen-

stände in seiner Umgebung. Diese Wirkung ist jedoch nicht eine blosse Wirkung in die Ferne, denn das umgebende Medium spielt dabei eine wesentliche Rolle. Man bedenke, welchen Einfluss ein + elektrisierter Körper A (Fig. 17) auf eine ihm genäherte, isolierte, unelektrische Metallkugel B ausübt. Einige der elektrischen Kraftlinien des den Körper A umgebenden Feldes gehen durch B hindurch; sie treten auf der dem A genäherten Seite ein und auf der entgegengesetzten wieder aus. Da die Kugel B keine eigene Ladung von Haus aus besitzt, so treten auf der einen Seite ebensoviel Kraftlinien in B ein, als auf der andern Seite austreten, oder mit andern Worten, die induzierte — Ladung auf der einen Seite ist ebenso gross, wie die induzierte + Ladung auf der andern Seite. Jedoch sind diese Ladungen nicht ganz gleichmässig verteilt; die — Ladung auf der dem A genäherten Seite ist mehr konzentriert und die Kraftlinien liegen hier dichter an einander.

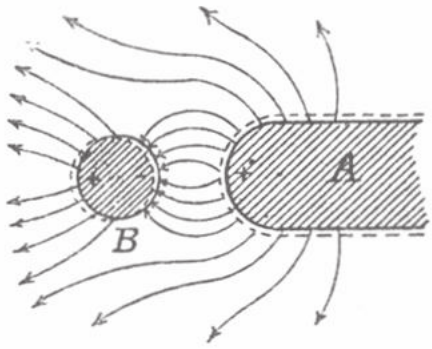


Fig. 17.

23. Wirkungen der Influenz. Wenn der Konduktor aus 2 Teilen zusammengesetzt ist, der Art, dass dieselben getrennt werden können, noch während der elektrisierte Körper seinen induzierenden Einfluss ausübt, so können die beiden Ladungen nach der Entfernung des elektrisierten Körpers sich nicht mehr vereinigen, sondern jede bleibt auf ihrem respektiven Teile des Konduktors zurück.

Wenn der Konduktor nicht durch Glasstützen isoliert, sondern mit dem Erdboden in Berührung gebracht wird, so wird nur das dem elektrisierten Körper zugekehrte Ende elektrisiert. Die abgestossene Ladung wird in der That so weit wie möglich abgestossen — bis in die Erde. Unter diesen Umständen erhält man nur eine Art von Elektrizität, nämlich die entgegengesetzte Art von der des elektrisierten Körpers, gleich viel, welcher Art diese letztere sei. Man hat in diesem Falle dieselbe Wirkung,

als ob ein elektrisierter Körper die Kraft besässe, die entgegengesetzte Art der Elektrizität aus der Erde an sich zu ziehen.

Die Grösse der beiden Ladungen, welche auf diese Weise auf einem Konduktor durch Influenz einer in der Nähe befindlichen elektrischen Ladung getrennt werden, hängt von der Grösse dieser Ladung und von der Entfernung des geladenen Körpers vom Konduktor ab. Je stärker der Glasstab elektrisiert und je näher er dem Konduktor gebracht wird, desto grösser ist seine induzierende Kraft. Höchstens aber kann der + Glasstab auf dem genäherten Ende des Konduktors eine negative Ladung induzieren, welche, abgesehen vom Vorzeichen, seiner eigenen Ladung gleich ist, und auf dem entfernten Ende dann eine gleiche Menge von + Elektrizität. Ehe jedoch der elektrisierte Körper so nahe gebracht wird, dass er diese Wirkung hat, tritt gewöhnlich eine andre Erscheinung ein, welche die Sachlage völlig ändert. Wenn nämlich der elektrisierte Körper mehr und mehr dem Konduktor genähert wird, so ziehen sich die entgegengesetzten Ladungen an den beiden sich gegenüberliegenden Oberflächen immer stärker an und sammeln sich hier immer dichter an, bis zuletzt, wenn der elektrisierte Körper sehr nahe gebracht ist, ein Funke überspringt und die beiden Ladungen auf diese Weise sich vereinigen und neutralisieren, während die induzierte + Ladung, welche vorher bis an das andre Ende des Konduktors abgestossen wurde, jetzt als permanente Ladung zurückbleibt, auch nachdem man den elektrisierten Körper entfernt hat. Fig. 18 veranschaulicht den Vorgang, welchen wir beobachten können, wenn wir eine + elektrisierte Metallkugel allmählich auf einen Tisch niederfallen lassen. Je mehr sich die Kugel dem Tische nähert, um so mehr verdichtet sich das sie umgebende elektrische Feld in dem zwischen Kugel und Tischplatte befindlichen Raume; und letztere wird

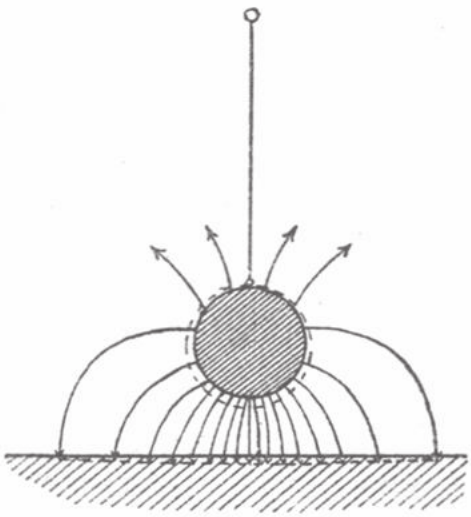


Fig. 18.

durch Influenz elektrisch. Da, wo die elektrischen Linien am dichtesten sind, ist die Spannung des Mediums am grössten, bis die Kugel sich dem Tische so weit genähert hat, dass der mechanische Widerstand der Luft schwächer ist als die elektrische Spannung. In diesem Augenblicke wird die Luftschicht von einem elektrischen Funken durchbohrt. Besteht das umgebende Medium nicht aus Luft, sondern aus Oel, so wird dasselbe erst bei einer viel stärkern Spannung durchbohrt.

24. Anziehung als Folge der Influenz. Wir können jetzt mit Hülfe des Prinzips der Influenz erklären, weshalb ein elektrisierter Körper unelektrische Gegenstände anzieht. In Fig. 17 (auf Seite 27) sei B eine kleine, an einem seidenen Faden aufgehängte Metallkugel, welche dem einen Ende eines geriebenen Glasstabes A genähert wird. Die + Ladung des A induziert dann eine — Ladung auf der zugewandten Seite, und eine gleiche $\dot{+}$ Ladung auf der entgegengesetzten Seite der Kugel. Die nähere Hälfte der Kugel wird deshalb angezogen, und die entfernte Hälfte abgestossen; aber die Anziehung überwiegt die Abstossung, weil die angezogene Ladung näher als die abgestossene ist. Deshalb wird die Kugel unter dem Einfluss beider Kräfte angezogen. Man kann sich leicht davon überzeugen, dass eine Kugel aus nicht-leitendem Stoffe, wie z. B. aus Schellack, nicht so stark angezogen wird, wie eine Kugel aus einem leitenden Stoffe. Dies *beweist* an sich, dass die Influenz in der That der Anziehung vorausgeht. In anderer Weise lässt sich dieser Satz wie folgt aussprechen: Die Spannung längs des elektrischen Feldes rechts von B ist grösser als die zur linken, und zwar infolge der stärkern Verdichtung der elektrischen Kraftlinien auf der rechten Seite von B.

25. Dielektrische Kraft. Wir haben wiederholt darauf hingewiesen, welche Rolle das umgebende Medium bei diesen Wirkungen in die Ferne spielt. Die Luft, das Oel, Glas oder andere als Medien benutzte Körper wirken nicht bloss als Isolatoren; sie sind auch bei der Ausbreitung der elektrischen Kräfte beteiligt. Deshalb nannte Faraday, welcher diese Thatsache ent-

deckte, solche Körper *dielektrisch*. Hätte man einen andern Körper als Medium benutzt, z. B. Oel, festen Schwefel oder Glas, so hätte der im gleichen Abstande befindliche, elektrisierte Körper eine stärkere Influenz ausgeübt. Die Fähigkeit eines nicht leitenden Körpers, die Influenz eines elektrisierten Körpers durch sich hindurch wirken zu lassen, heisst seine *dielektrische Kraft*. (Früher nannte man dieselbe seine spezifische Induktions-Kapazität; vergl. Art. 56 und die 23. Vorlesung.)

26. Der Elektrophor. Wir sind jetzt im Stande, die Wirkungsweise eines einfachen und sinnreichen Apparates auseinanderzusetzen, welcher von Volta im Jahre 1775 erfunden wurde, in der Absicht, mit Hülfe des Prinzips der Influenz eine unbegrenzte Anzahl elektrischer Ladungen aus einer einzigen Ladung zu gewinnen. Dieser Apparat ist der **Elektrophor** [1]). Er besteht aus 2 Teilen, einem runden Harzkuchen von circa 30 bis 40 cm Durchmesser, der in eine Form von Metall gegossen ist, und einer runden Scheibe von etwas kleinerem Durchmesser, welche aus Metall oder mit Stanniol überzogenem Holz besteht und mit einem Glasgriff versehen ist. Zur Herstellung des Kuchens kann man Schellack oder Siegellack, oder auch eine Mischung von Harz, Schellack und venetianischem Terpentin nehmen. Eine Platte aus Schwefel thut dieselben Dienste, ist jedoch leicht zerbrechlich. Eine Scheibe von Hartgummi eignet sich vorzüglich zu diesem Zwecke; doch muss man sie von Zeit zu Zeit mit Ammoniak waschen und mit Paraffinöl abreiben, weil der darin enthaltene Schwefel leicht oxidiert und dann Feuchtigkeit anzieht. Beim Gebrauche des Elektrophors muss man den Harzkuchen mit einem warmen Wolltuche oder, was noch besser ist, mit einem Katzenfell peitschen oder reiben. Darauf stellt man die Scheibe oder den Deckel auf den Kuchen, und berührt erstere einen Augenblick mit dem Finger. Hebt man jetzt den Deckel an dem

1) Volta's Elektrophor erschien im Jahre 1775. Das Prinzip wurde schon früher von Wilcke aufgestellt, welcher im Jahre 1762 in der Schwedischen Akademie der Wissenschaften zwei durch Influenz wirkende »Ladungs-Maschinen« beschrieb.

gläsernen Handgriffe ab, so findet man, dass derselbe stark + elektrisch geworden ist, derart, dass er einen Funken gibt, wenn man ihm den Knöchel der Hand nähert. Hierauf kann man den Deckel wieder auflegen, berühren und wieder abheben und auf diese Weise eine beliebige Anzahl von Funken erhalten, ohne dass die ursprüngliche Ladung des Harzkuchens dadurch merklich vermindert wird.

Die Theorie des Elektrophors ist höchst einfach zu verstehen, falls der Leser nur das oben erklärte Prinzip der Influenz recht verstanden hat. Wenn man zunächst den Harzkuchen mit einem Katzenfell peitscht, so wird seine Oberfläche negativ elektrisch, wie es in Fig. 19 angedeutet ist. Setzt man dann den Metalldeckel darauf, so berührt derselbe in Wirklichkeit (wegen der immer vorhandenen kleinen Unebenheiten) den Kuchen nur in

Fig. 19.

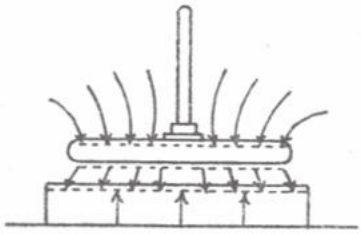


Fig. 20.

3 bis 4 Punkten und kann daher als ein isolierter Konduktor in der Nähe eines elektrischen Körpers betrachtet werden. Die — Elektrizität des Kuchens wirkt daher mittels Influenz auf den Metalldeckel, indem sie eine + Ladung auf seine untere Seite hinzieht, und eine negative Ladung nach seiner obern Seite hin abstösst. Diesen Zustand zeigt Fig. 20. Wenn man hierauf den Deckel einen Augenblick mit dem Finger berührt, so wird die — Ladung auf der obern Seite des Deckels von der aus der Erde durch die Hand und den Körper des Experimentierenden zuströmenden Elektrizität neutralisiert. Die angezogene + Ladung bleibt jedoch am Deckel haften, da dieselbe durch die Anziehung der — Ladung des Kuchens gewissermassen gebunden wird. Fig. 21 zeigt die Anordnung, nachdem man den Deckel berührt hat. Wenn man nun zuletzt noch den Deckel mittelst seines Hand-

griffes abhebt, so wird die zurückgebliebene + Ladung nicht länger auf der untern Seite durch Anziehung gebunden, sondern verteilt sich auf beiden Seiten des Deckels und kann dann, wie schon gesagt wurde, dazu dienen, einen Funken zu liefern. Es ist klar, dass kein Teil der anfänglichen Ladung des Harzkuchens bei diesem Versuche verbraucht wurde, und deshalb kann man den-

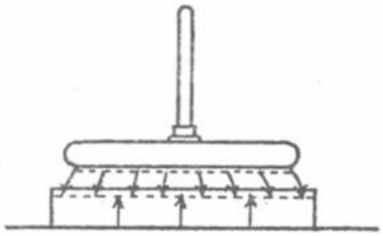


Fig. 21.

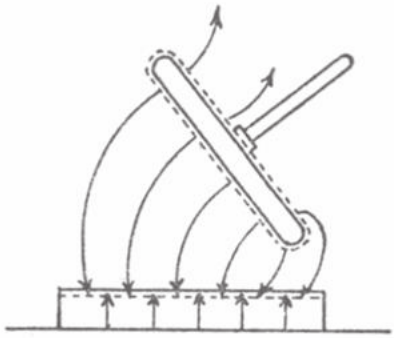


Fig. 22.

selben so oft wiederholen, wie man will. Thatsächlich verschwindet allerdings die Ladung des Kuchens nach und nach, zumal wenn die Luft feucht ist. Deshalb muss man von Zeit zu Zeit die ursprüngliche Ladung erneuern, indem man den Kuchen von Neuem mit dem Katzenfell peitscht. Die Mühe, den Deckel bei jedem Versuche mit dem Finger zu berühren, kann man sich dadurch sparen, dass man die Metallform, in welche der Harzkuchen gegossen ist, mit einem Messingstift oder einem Stanniolstreifen versieht, welcher bis auf die obere Seite des Kuchens reicht, so dass ersterer jedesmal den Deckel berührt und auf diese Weise die negative Ladung desselben durch Zuströmen der Elektrizität aus dem Erdboden neutralisiert. Das Prinzip, auf welchem der Elektrophor beruht, lässt sich demnach in folgender Weise aussprechen: *Wenn ein Konduktor berührt wird, so lange ein geladener Körper auf ihn durch Influenz wirkt, so erhält ersterer eine Ladung von entgegengesetzter Art* [1]).

1) Priestley sprach 1767 diesen Satz in folgender Weise aus: Wenn ein Körper A einen Ueberschuss des elektrischen Fluidums hat, so stösst dasselbe das elektrische Fluidum jedes andern Körpers B ab, der sich innerhalb der Influenzsphäre von A befindet, und treibt es in die entfernteren Teile des Körpers B oder ganz aus demselben heraus, falls ein Ableitungsweg vorhanden

Da man die Elektrizität, welche der Elektrophor auf diese Weise liefert, nicht auf Kosten eines Teils der ursprünglichen Ladung erhält, so ist es von Interesse, die Quelle aufzusuchen, aus welcher hier fort und fort Energie geschöpft werden kann. Denn dieselbe kann nicht ohne den Aufwand einer andern Energie ins Leben gerufen werden, ebensowenig wie eine Dampfmaschine ohne Brennmaterial arbeiten kann. Thatsächlich findet man nun, dass es eine etwas grössere Arbeit ist, den Deckel aufzuheben, wenn er geladen ist, als wenn er nicht geladen ist; denn im ersteren Falle muss man ausser der Schwere auch noch die Spannung des elektrischen Feldes überwinden. Es wird also durch die Muskelkraft des Experimentierenden bei dem Abheben des Deckels eine Arbeit geleistet, die etwas grösser ist, als diejenige, welche bei dem Auflegen gewonnen werden könnte, und das ist die wahre Quelle der in den einzelnen Ladungen angesammelten Energie.

Die rein mechanische Arbeit, den Deckel mit dem Kuchen in Berührung zu bringen und dann wieder abzuheben, kann maschinenmässig durch geeignete mechanische Vorrichtungen verrichtet werden, welche dann die Erregung dieser Induktions-Ladungen kontinuierlich machen. Das neueste dieser **kontinuierlichen Elektrophore** ist die in der 5. Vorlesung beschriebene Maschine von Wimshurst.

27. Freie und gebundene Elektrizität. Wir haben eine elektrische Ladung auf der Oberfläche eines Konduktors als gebunden bezeichnet, falls dieselbe von einer in der Nähe befindlichen Ladung entgegengesetzter Art angezogen wird. Den umgekehrten Ausdruck »*freie* Elektrizität« gebraucht man bisweilen von dem gewöhnlichen Zustande der Elektrizität auf einem geladenen Konduktor, der sich nicht in der Nähe einer Ladung entgegengesetzter Art befindet. Eine *freie* Ladung auf einem isolierenden Konduktor entweicht sofort in die Erde, wenn

ist. Mit andern Worten: Körper, welche sich innerhalb einer elektrischen Atmosphäre befinden, nehmen stets eine Elektrizität an, welche derjenigen entgegengesetzt ist, die dieser Atmosphäre entspricht.

eine leitende Verbindung hergestellt wird, wie wir in der nächsten Vorlesung erklären werden. Es ist dabei unwesentlich, welcher Punkt des Konduktors berührt wird. Für den in Fig. 14 dargestellten Fall z. B., wo ein + elektrischer Körper — Elektrizität auf dem zugekehrten, und + Elektrizität auf dem abgekehrten Ende eines isolierten Konduktors induziert, ist die — Ladung gebunden, da sie angezogen wird, während die + Ladung am andern Ende frei ist, da sie abgestossen wird; und wenn der isolierte Konduktor von einem auf dem Erdboden Stehenden berührt wird, so entweicht die freie Elektrizität durch seinen Körper in die Erde oder in die Wände des Zimmers, während die gebundene Elektrizität zurückbleibt, gleichviel, ob der Experimentierende den Konduktor an diesem oder jenem Ende oder in der Mitte berührt.

28. Methode, das Goldblattelektroskop durch Influenz zu laden. Der Leser wird jetzt in der Lage sein, die Methode zu verstehen, nach welcher ein Goldblattelektroskop mit derjenigen Elektrizität geladen werden kann, welche der zu seiner Ladung benutzten entgegengesetzt ist. In der zweiten Vorlesung haben wir angenommen, dass ein Elektroskop auf die Weise geladen wurde, dass man den Knopf mit dem elektrisierten Körper berührte und so gleichsam einen geringen Teil der Ladung in die Goldblätter strömen liess. Ein mit Seide geriebener Glasstab, der also + elektrisch ist, würde den Goldblättern auf diese Weise offenbar + Elektrizität mitteilen.

Nehmen wir jedoch an, dass der geriebene Glasstab einige Zentimeter hoch über den Knopf des Elektroskopes gehalten wird, wie es Fig. 10 wirklich zeigt. Auch bei dieser Entfernung divergieren die Goldblätter; und diese Wirkung ist eine Folge der Influenz. Die Goldblätter, der Messingdraht und der Knopf bilden einen zusammenhängenden Leiter, der durch die Glasflasche vom Boden isoliert ist. Die Nähe der + Elektrizität des Glasstabes wirkt infolge der Influenz auf diesen isolierten Konduktor, und induziert — Elektrizität auf dem nahen Ende, d. h. dem Knopfe und + Elektrizität auf dem fernen Ende, d. h.

auf den Goldblättern, welche divergieren. Von diesen beiden induzierten Ladungen ist die — auf dem Knopfe gebunden, während die + auf den Blättern frei ist. Wenn jetzt, noch während der elektrisierte Glasstab über dem Elektroskope gehalten wird, ein auf dem Erdboden Stehender den Knopf berührt, strömt die eine dieser beiden induzierten Ladungen in den Boden, und zwar die freie Ladung — nicht die des Knopfes selbst, denn diese war gebunden, sondern jene auf den Goldblättern, welche frei war — und die Goldblätter fallen sofort zusammen. Es bleibt nur die — Ladung auf dem Knopfe zurück, welche solange gebunden ist, wie die + Ladung des Glasstabes in der Nähe ist und sie anzieht. Wenn jedoch nun der Glasstab schnell weggezogen wird, so ist die — Ladung auf dem Knopfe nicht mehr gebunden, sondern frei, und strömt folglich zum Teil auch in die Blätter, welche dann wieder divergieren, diesmal jedoch infolge ihrer — Elektrizität.

29. **Der Rückschlag.** Wenn ein geladener Konduktor plötzlich entladen wird, so hat man oft beobachtet, dass in der Nähe befindliche Personen eine Endladung spüren, welche sogar auf Elektroskope wirken oder Funken geben kann. Diese unter dem Namen *Rückschlag* bekannte Erscheinung ist eine Folge der Influenz. Denn durch das Vorhandensein eines geladenen Konduktors wird in benachbarten Körpern eine Ladung entgegengesetzter Art induziert, und bei der Entladung des Konduktors können diese benachbarten Körper ihre induzierte Ladung ebenfalls plötzlich in die Erde oder in andere leitende Körper entladen. Einen Rückschlag fühlen oft auf dem Erdboden stehende Personen in dem Augenblicke, wo ein Blitzstrahl einen in ihrer Nähe befindlichen Gegenstand getroffen hat.

IV. VORLESUNG: *Leitung und Verteilung der Elektrizität.*

30. **Leitung.** Am Ende der ersten Vorlesung setzten wir auseinander, dass gewisse Körper, z. B. die Metalle, die Elektrizität leiten, während andere zu den Nichtleitern oder Isolatoren gehören. Diese Entdeckung verdanken wir Stephen Gray,

welcher im Jahre 1729 fand, dass ein Kork, der in das eine Ende einer geriebenen Glasröhre gesteckt wurde, ja sogar ein in diesen Kork gestecktes Stück Holz, leichte Körper anzogen. Ebenso fand er, dass Metalldraht und Bindfaden die Elektrizität leiteten, Seide dagegen nicht.

Wir können diese Versuche wiederholen mit einem Glasstabe (Fig 23), welcher mit einem Korke oder einem Stück

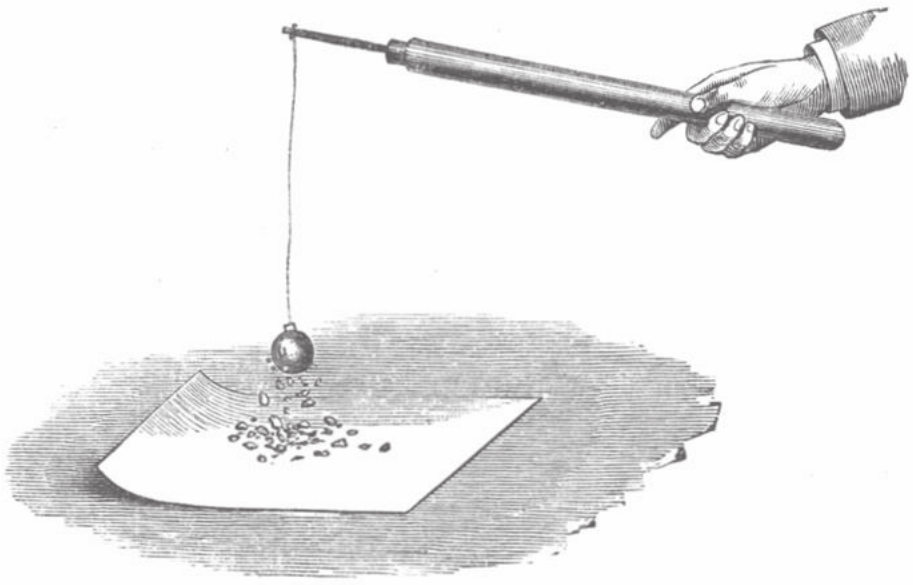


Fig. 23.

Holz versehen ist. Hängt man an das Ende desselben eine Metallkugel oder einen Messingknopf mittelst eines leinenen Fadens oder eines Drahtes, so findet man, dass die Kugel die Eigenschaft erhält, leichte Körper anzuziehen, nachdem der Glasstab gerieben wurde. Nimmt man jedoch einen trockenen seidenen Faden, so strömt keine Elektrizität in die Kugel hinab.

Es gelang Gray sogar, eine elektrische Ladung durch einen von seidenen Oesen getragenen Hanffaden über 700 Fuss weit zu leiten. Etwas später gelang es Du Fay, die Elektrizität durch einen angefeuchteten Faden keine geringere Strecke als 1256 Fuss weit zu leiten, und so die Leitungsfähigkeit von Feuchtigkeit zu beweisen. Seit jener Zeit datiert die Einleitung der Körper in *Leiter* und *Nichtleiter*.

Diese Einteilung kann man jedoch nicht völlig aufrecht erhalten, da eine grosse Klasse von Stoffen als teilweise Leiter eine Zwischenstellung einnehmen. Trockenes Holz ist z. B. ein schlechter Leiter und auch ein schlechter Nichtleiter; es leitet gut genug, um die durch Reibung erregte Elektrizität hoher Spannung durchzulassen, aber es ist ein schlechter Leiter für die von kleinen Voltaischen Batterieen herrührende Elektrizität von verhältnismässig geringer Spannung. Von Körpern, welche sehr schlechte Leiter sind, sagt man, dass sie der durch sie strömenden Elektrizität einen grossen **Widerstand** bieten. In der That giebt es keinen so guten Leiter, dass er überhaupt keinen Widerstand böte, und umgekehrt giebt es keinen Körper mit so grossem Widerstande, dass er nicht noch ein wenig leitete. Sogar Silber, welches von allen bekannten Körpern am besten leitet, bietet der strömenden Elektrizität im geringen Grade noch Widerstand, und andererseits gestattet ein Nichtleiter, wie z. B. Glas, obschon sein Widerstand viele Millionen mal grösser ist, als der eines beliebigen Metalls, dennoch einer sehr kleinen Menge von Elektrizität den Durchgang. In der folgenden Tabelle sind die aufgezählten Körper so geordnet, dass jeder vorhergehende besser als der nachfolgende leitet:

Silber	Gute Leiter.
Kupfer	
Andere Metalle . .	
Holzkohle	
Wasser	
Der menschl. Körper	Teilweise Leiter.
Baumwolle	
Trockenes Holz . .	
Marmor	
Papier	

Oele	Nichtleiter.
Porzellan	
Wolle	
Seide	
Harz	
Guttapercha . . .	
Schellack	
Ebenholz	
Paraffin	
Glas	
Quarz (geschmolzen) .	
Luft	

Eine einfache Methode, um durch den Versuch zu erkennen, ob ein Körper ein Leiter ist oder nicht, besteht darin, dass man den zu prüfenden Körper in die Hand nimmt und den Knopf eines geladenen Goldblattelektroskopes mit demselben berührt. Ist der Körper ein Leiter, so entweicht die Elektrizität durch ihn und durch den Körper des Experimentierenden in die Erde, und das Elektroskop ist alsdann entladen. Durch gute Leiter strömt die Elektrizität so schnell, dass die Entladung thatsächlich momentan statt findet. Weiteres über diese Frage findet man in der 33. Vorlesung.

31. Verteilung der Elektrizität auf den Körpern. Wenn man an einer Stelle eines Nichtleiters Elektrizität erregt, so bleibt dieselbe an dieser Stelle, und verbreitet sich nicht über die ganze Oberfläche oder doch jedenfalls nur äusserst langsam. Wenn z. B. ein Glasstab an seinem einen Ende gerieben wird, so wird nur dieses Ende elektrisch. Erwärmtes Glas ist jedoch ein Leiter. Wenn ein warmer Harzkuchen an einer Stelle mit einem Tuchlappen gerieben wird, so zieht nur diese Stelle leichte Körper an wie man dadurch nachweisen kann, dass man mit Hilfe eines Musselins feines Pulver darauf siebt, wie z. B. Mennige, Bärlappsamen, oder Grünspan, welche an den elektrisierten Stellen der Oberfläche haften bleiben. Die Sache ist jedoch ganz anders, wenn man irgend einem Teile eines isolierten Leiters eine elek-

trische Ladung mitteilt, denn letztere verbreitet sich *sofort* über die ganze Oberfläche, jedoch im allgemeinen nicht gleichmässig über alle Punkte derselben.

32. Die Ladung hat ihren Sitz auf der Oberfläche. Eine elektrische Ladung hat ihren Sitz nur auf der Oberfläche eines Leiters. Ein Beweis hierfür ist der Umstand, dass es für die Verteilung gleichgültig ist, woraus das Innere eines Leiters besteht; der Leiter kann festes Metall sein oder hohl oder selbst aus mit Stanniol oder Blattgold überzogenem Holz bestehen: voraus-

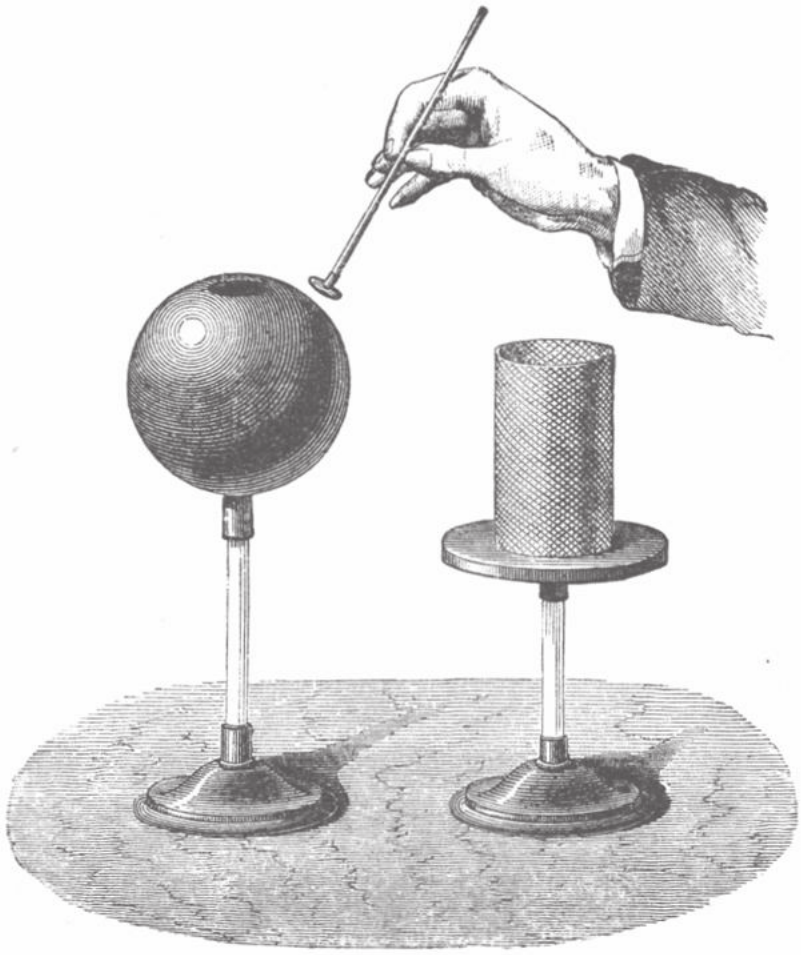


Fig. 24.

gesetzt, dass die Gestalt die nämliche ist, verteilt sich in allen Fällen die Ladung in genau derselben Weise über die Oberfläche. Es giebt auch mehrere Methoden, um diese wichtige Thatsache durch den Versuch zu beweisen. Man lege eine hohle Metallkugel (Fig. 24), welche oben eine Oeffnung hat, auf eine isolierende

Stütze und lade erstere, indem man ein paar Funken von einem Elektrophor auf sie überspringen lässt. Dass sich im Innern der Kugel dann keine Ladung befindet, kann man auf folgende Weise zeigen: Um die Art der Elektrizität eines geladenen Körpers zu erkennen, ist es zweckmässig, ein Mittel zu haben, einen kleinen Teil der Ladung absondern und dann prüfen zu können. Um solch eine Probe zu erhalten, gebraucht man einen als **Probe-Platte** bekannten Apparat. Derselbe besteht aus einer kleinen Scheibe von Kupferblech oder Goldpapier, welche an das eine Ende eines dünnen Glasstabes befestigt ist. Legt man diese Scheibe an irgend einer Stelle auf die Oberfläche eines elektrischen Körpers, so strömt ein Teil der Ladung in dieselbe; man kann sie dann wegnehmen und die so erhaltene Probe mit einem Goldblattelektroskop in der gewöhnlichen Weise prüfen. Für manchen Zweck eignet sich ein an einem Glasstab befestigtes Metallkügelchen besser, als eine flache Scheibe. Wenn eine solche Probeplatte an die äussere Seite unserer elektrisierten Hohlkugel gehalten und dann mit dem Knopfe eines Elektroskopes in Berührung gebracht wird, so divergieren die Goldblätter, zeigen also das Vorhandensein einer Ladung an. Wenn man jedoch die Probeplatte vorsichtig durch die Oeffnung führt, die *innere Seite* der Kugel mit ihr berührt, und sie dann abhebt, so findet man, dass die innere Seite nicht elektrisch ist. Eine elektrisierte Zinnkanne zeigt ein ähnliches Resultat; desgleichen auch ein Cylinder von Drahtgeflecht.

33. Biot's Versuch. Biot bewies dieselbe Thatsache auf anderm Wege. Eine Kupferkugel wurde elektrisiert und isoliert. Zwei hohle Halbkugeln von Kupfer, welche einen etwas grösseren Durchmesser hatten und mit gläsernen Handgriffen versehen waren, wurden dann von aussen über die Kugel gedeckt (Fig. 25). So lange sie nicht mit ihr in Berührung kamen, blieb die Ladung auf der innern Kugel; wenn jedoch die äussere Hülle die innere Kugel auch nur einen Augenblick berührte, strömte die gesamte Ladung nach aussen, und wenn dann die Halbkugeln wieder getrennt und abgehoben wurden, so ergab sich, dass die innere Kugel jetzt vollständig entladen war.

34. Weitere Erklärung. Ohne Zweifel ist die Erklärung für dies Verhalten der Elektrizität in der früher erwähnten Eigenschaft zu suchen, welche beide Arten der Elektrizität gleichmässig besitzen, dass nämlich jede sich selbst abstösst. Aus diesem

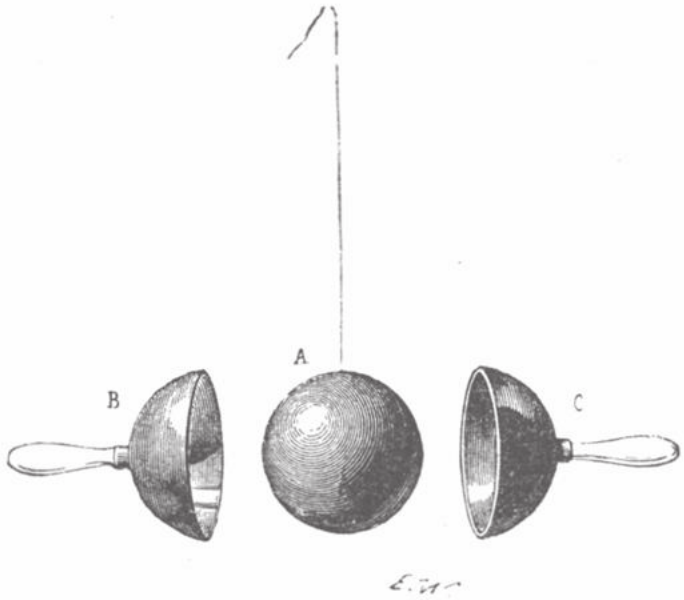


Fig. 25.

Grunde sucht sie so weit wie möglich vom Zentrum sich zu entfernen und bleibt auf der Oberfläche. Ein wichtiger Satz, des Inhalts, dass im Innern eines geschlossenen Leiters keine elektrische Kraft vorhanden ist, soll in der 21. Vorlesung bewiesen werden; einstweilen muss man beachten, dass die Beweise vorläufig nur das Nichtvorhandensein einer *freien* elektrischen Ladung im Innern hohler Leiter darthun sollen. Abgesehen von andern Versuchen zeigte Terquem, dass man ein Paar Goldblätter, welche innerhalb eines Drahtgeflechts aufgehängt waren, nicht zum divergieren bringen konnte, falls jenes elektrisiert wurde. Faraday verfertigte einen kegelförmigen Beutel aus Leinen-Gaze, der, wie in Fig. 26 von einer isolierenden Stütze getragen wurde und mit Seidenfäden versehen war, so dass seine innere Seite nach aussen gekehrt werden konnte. Derselbe wurde geladen und mit Hilfe der Probeplatte und des Elektroskops gezeigt, dass die Ladung sich auf der äussern Seite des Beutels befand. Dann wurde die innere Seite nach aussen gezogen, und es stellte sich heraus, dass die Elektrizität wieder auf der Seite war, welche jetzt die

äussere war. Einen höchst überraschenden Versuch stellte Faraday mit einem hohlen Würfel von 12 Fuss Kantenlänge an, der aus mit Stanniol überzogenem Holz verfertigt, isoliert, und durch eine

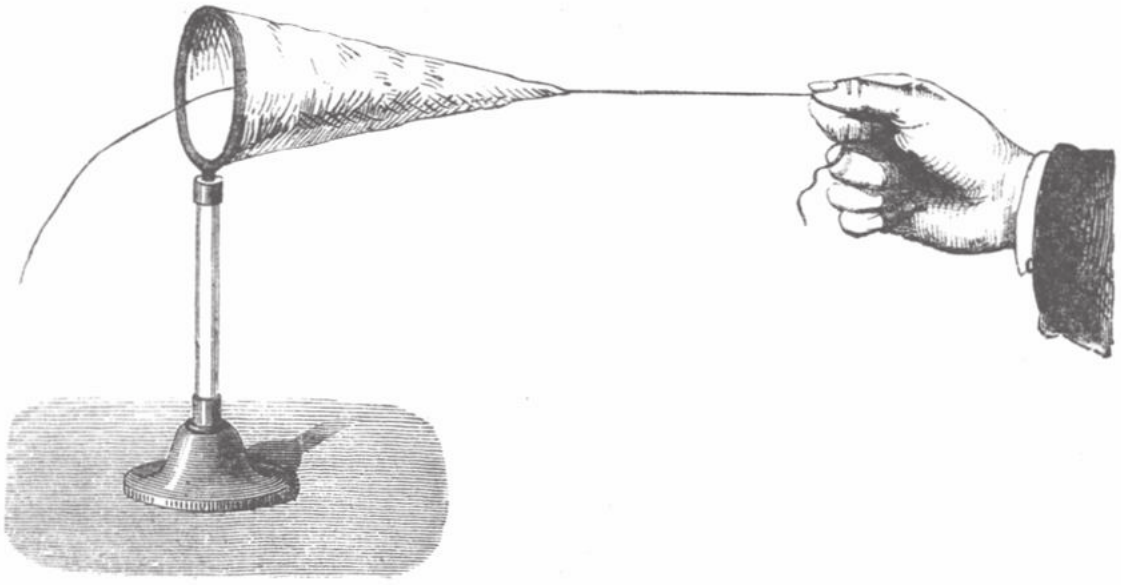


Fig. 26.

kräftige Maschine geladen war, so dass grosse Funken und Strahlenbüschel überall von seiner äussern Fläche hervorblitzten. In diesen Würfel stellte Faraday eines seiner empfindlichsten Elektroskope; doch konnte er, wenn dasselbe innerhalb des Würfels war, nicht den geringsten Einfluss auf dasselbe wahrnehmen.

35. Anwendungen. Man hat dies bei der Konstruktion empfindlicher Elektrometer und andrer Apparate benutzt, welche vor dem Einflusse elektrischer Körper dadurch wirksam geschützt werden können, dass man sie mit einem dünnen Metall-Futterale umgiebt, welches überall geschlossen ist, mit Ausnahme derjenigen Stellen, wo zum Zwecke der Beobachtung Oeffnungen angebracht werden müssen. Besonders Metall-Gaze eignet sich hierzu, welche fast durchsichtig ist. Der verstorbene Professor Maxwell hat auch den Vorschlag gemacht, Gebäude vor dem Blitz dadurch zu schützen, dass man ihre äussere Seite mit einem Netzwerk von Drähten überzieht.

36. Scheinbare Ausnahmen. Es giebt zwei scheinbare Ausnahmen von dem Gesetze, dass die Elektrizität sich nur auf der äussern Seite der Leiter befindet. 1) Wenn sich im Innern

des hohlen Leiters elektrische, isolierte Körper befinden, so wirken dieselben induzierend und ziehen die entgegengesetzte Art der Ladung nach der inneren Seite des hohlen Leiters. 2) Wenn die Elektrizität als ein elektrischer Strom fliesst, so fliesst sie durch die Substanz des Leiters. — Das Gesetz beschränkt sich also auf in Ruhe befindliche Elektrizität, d. h. auf *statische* Ladungen.

37. Faraday's Eis-Eimer-Versuch. Es verdient hier ein Versuch Faraday's Beachtung, welcher den Einfluss zeigt, den die Induktion bei diesen Naturerscheinungen ausübt. Faraday liess eine geladene Metallkugel langsam in einen hohlen Leiter hinab, der durch einen Draht mit einem Goldblatt-Elektroskop verbunden war (Fig. 27) und beobachtete den Erfolg. Da ein zinnerner Eiseimer zu diesem Zwecke sich gut eignet, so hat dieser Versuch darnach seinen Namen bekommen, obgleich jeder andre hohle Leiter, z. B. eine Zinnbüchse oder eine silberne Kanne, auf eine Glasstütze gestellt, natürlich ebenso zweckmässig sein würde. Man beobachtete nun die folgenden Erscheinungen: Nehmen wir an, die Kugel hätte eine + Ladung: wird dieselbe in den hohlen Konduktor hinabgelassen, so beginnen die Goldblätter zu divergieren, denn die Ladung wirkt induzierend und zieht eine — Ladung auf die innere Seite und stösst eine + Ladung nach der äussern Seite ab. Die Goldblätter divergieren mehr und mehr, bis die Kugel gerade mitten in dem hohlen Leiter ist; von diesem Augenblicke an findet keine grössere Divergenz mehr statt. Bringt man nun die Kugel mit der innern Seite des Eimers in Berührung, so divergieren die Goldblätter nach wie vor, und zieht man jetzt die Kugel heraus, so ergiebt sich, dass sie alle ihre Elektrizität verloren hat. Der Umstand, dass die Goldblätter nicht stärker divergieren, nachdem

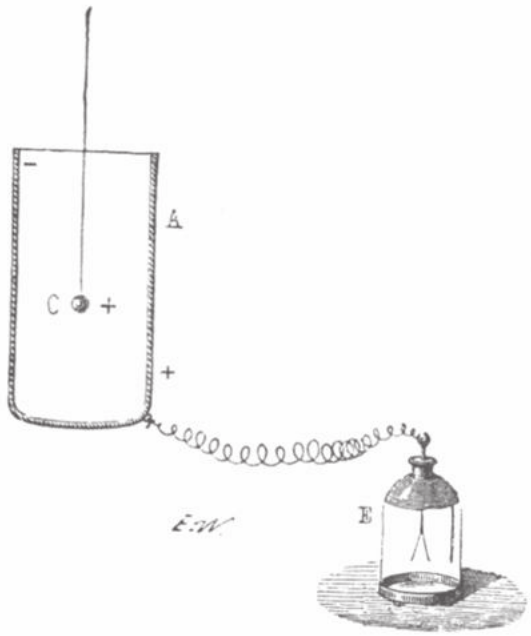


Fig. 27.

die Kugel die Innenseite berührte, als im Augenblicke vorher, beweist, dass, wenn die geladene Kugel gerade mitten in dem hohlen Leiter ist, jede der induzierten Ladungen genau ebenso gross ist, wie die Ladung der Kugel selbst; die innere — Ladung hebt genau in dem Augenblicke ihrer Berührung die Ladung der Kugel auf, während die ebenso grosse äussere Ladung unverändert bleibt. Ein *elektrischer »Käfig«*, wie z. B. dieser Eiseimer, giebt, wenn derselbe mit einem Elektroskope oder Elektrometer in Verbindung gebracht wird, ein ausgezeichnetes Mittel an die Hand, um die Ladung irgend eines Körpers zu prüfen, welcher in das Innere des »Käfigs« hineinpasst. Denn ohne den geringsten Teil der Ladung des Körpers zu verbrauchen (was wir bei Anwendung der Methode mit der Probe-Platte nicht vermeiden können) können wir die auf die äussere Seite des Käfigs abgestossene, induzierte Ladung prüfen, und wir wissen, dass diese genau ebenso gross und von derselben Art ist, wie die des geladenen und in den Käfig eingesenkten Körpers. Wenn wir zwei gleiche Ladungen entgegengesetzter Art gleichzeitig in den Käfig bringen, so bemerken wir auf der äussern Seite keine Wirkung.

38. Verteilung der Ladung. Eine elektrische Ladung verteilt sich im allgemeinen nicht gleichförmig über die Oberfläche der Körper. Der Versuch zeigt, dass sich an den Kanten und Ecken der Körper mehr Elektrizität befindet, als an den flachen Stellen derselben. Diese Verteilung kann man aus der in der 21. Vorlesung dargethanen Theorie herleiten, vorläufig aber wollen wir einige der hauptsächlichsten Fälle angeben, deren wirkliches Vorhandensein gezeigt werden kann. Der Ausdruck **„elektrische Dichte“** wird gebraucht, um die Menge der Elektrizität an irgend einem Punkte einer Oberfläche zu bezeichnen: *die elektrische Dichte in einem Punkte ist gleich der Zahl der elektrischen Einheiten pro Flächeneinheit* (d. h. pro Quadrat-Zentimeter), wobei die Verteilung über diese kleine Fläche als gleichmässig vorausgesetzt wird.

a) **Kugel.** Die Verteilung einer Ladung auf einer isolierten Kugel von leitendem Material ist gleichförmig, vorausgesetzt, dass

sich in der Nähe der Kugel keine andern Leiter oder andre elektrische Körper befinden, dass die Kugel ebenfalls isoliert ist, d. h.: Die Dichte der Elektrizität ist in allen Punkten der ganzen Kugel dieselbe, sie ist gleichförmig. Dies wird veranschaulicht durch die punktierte Linie um die Kugel in Fig. 28, welche

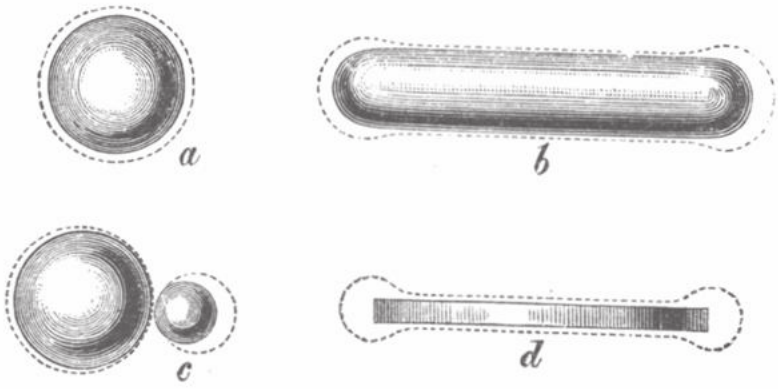


Fig. 28.

überall von der Kugel denselben Abstand hat, und eine gleiche Dicke der Ladung in allen Punkten der Oberfläche andeuten soll. Es muss in Erinnerung gebracht werden, dass die Ladung in Wirklichkeit überhaupt keine wahrnehmbare Dicke besitzt; sie haftet an oder auf der Oberfläche; aber man kann nicht sagen, dass sie eine Schicht auf derselben bildet.

b) **Cylinder mit abgerundeten Enden.** Auf einem verlängerten Leiter, wie derselbe häufig bei elektrischen Apparaten Anwendung findet, ist die Dichte am grössten an den Enden, wo die Krümmung der Oberfläche am stärksten ist.

c) **Zwei sich berührende Kugeln.** Wenn 2 sich berührende Kugeln isoliert und geladen werden, so ergiebt sich, dass die Dichte an denjenigen Stellen am grössten ist, welche am weitesten vom Berührungspunkte entfernt sind, am geringsten dagegen in der Spalte zwischen den Kugeln. Wenn die Kugeln verschieden gross sind, so ist die Dichte grösser auf der kleinern Kugel, deren Oberfläche stärker gekrümmt ist. Auf einem **eiförmigen** oder **birnenförmigen** Leiter ist die Dichte am grössten an dem schmalen Ende. Auf einem **Kegel** ist die Dichte an der Spitze am grössten; und wenn der Kegel in eine scharfe Spitze ausläuft, so ist hier die Dichte bei weitem

grösser, als in irgend einem andern Punkte. In einem Punkte kann die Dichte der angesammelten Elektrizität in der That so gross sein, dass die benachbarten Luftmoleküle elektrisiert und dann abgestossen werden, (vergl. Art. 47.) so dass auf diese Weise ein fortwährender Verlust der elektrischen Ladung statt findet. Deshalb müssen Spitzen und scharfe Kanten an elektrischen Apparaten stets vermieden werden, ausgenommen in dem Falle, wo eine Entladung besonders gewünscht wird.

d) **Flache Scheibe.** Die Dichte einer Ladung auf einer flachen Scheibe ist, wie wir erwarten konnten, an den Kanten grösser als auf den flachen Oberflächen; dagegen ist die Verteilung über die flachen Oberflächen nahezu gleichförmig.

Diese verschiedenen Thatsachen kann man bestätigen, indem man eine kleine Probeplatte hinter einander an verschiedene Stellen der elektrisierten Körper anhält und darauf die von der Probeplatte aufgenommene Menge der Elektrizität durch ein Elektroskop oder ein Elektrometer prüft. Coulomb, welcher mathematisch sowohl wie experimentell viele der wichtigsten Fälle der Verteilung untersuchte, gebrauchte die Torsionswage, um seine Rechnungen zu prüfen. Er untersuchte auf diese Weise den Fall des Umdrehungsellipsoides, und fand, dass die Dichte der Ladung in den Endpunkten der Achsen den Längen dieser Achsen proportional war. Er zeigte auch, dass die Dichte der Ladung in einem beliebigen andern Punkte der Oberfläche des Ellipsoids der Länge des Lothes proportional ist, welches man vom Zentrum auf die Tangentialebene jenes Punktes fällen kann. Auch Riess untersuchte verschiedene interessante Fälle der Verteilung. Er fand, dass die Dichte in den Mitten der Kanten eines Würfels fast $2\frac{1}{2}$ mal so gross war, als die Dichte in der Mitte einer Seitenfläche; während die Dichte in einer Ecke des Würfels mehr als vier mal so gross war.

39. Wiederverteilung der Ladung. Wenn ein Teil der Ladung eines isolierten Leiters weggenommen wird, so verteilt sich der Rest der Ladung sofort wieder in derselben Weise über die Oberfläche, wie die ursprüngliche Ladung, vorausgesetzt,

dass dieselbe ebenfalls *isoliert* ist, d. h. dass keine andern Leiter oder geladene Körper in der Nähe sind, welche durch komplizierte Influenzwirkungen die Verteilung stören könnten.

Wenn ein Leiter mit einer gewissen Menge Elektrizität geladen ist und ein anderer Leiter von derselben Grösse und Gestalt (doch ungeladen) einen Augenblick lang mit ihm in Berührung gebracht und dann wieder von ihm getrennt wird, so wird man finden, dass die Ladung sich gleichmässig auf beide verteilt hat. Auf dieselbe Weise kann eine Ladung in drei oder mehr gleiche Teile geteilt werden, indem sie gleichzeitig auf 3 oder mehr gleiche und ähnliche Leiter verteilt wird, welche zur Berührung gebracht und symmetrisch aufgestellt werden.

Wenn 2 gleiche Metallkugeln, welche an seidenen Schnüren aufgehängt und mit ungleichen Mengen von Elektrizität geladen sind, einen Moment lang mit einander in Berührung gebracht und dann wieder getrennt werden, so findet man, dass sich die Ladung gleichmässig verteilt hat, indem jetzt die Ladung jeder einzelnen Kugel gleich der halben Summe beider Ladungen ist. Dies lässt sich auch auf den Fall von Ladungen entgegengesetzter Art ausdehnen. Nehmen wir z. B. an, dass von 2 ähnlichen Leitern der eine mit einer + Ladung von 5 Einheiten, der andre mit 3 Einheiten negativer Elektrizität geladen wäre, so wird jeder nach gegenseitiger Berührung und Trennung eine + Ladung von einer Einheit haben; denn die algebraische Summe von + 5 und — 3 ist + 2, welche auf die beiden gleichen Leiter verteilt, für jeden + 1 bringt.

40. Kapazität der Leiter. Wenn die Leiter von ungleicher Grösse oder Gestalt sind, so sind die Mengen, welche die einzelnen Leiter bei dieser Wiederverteilung erhalten, nicht gleich, sondern proportional der elektrischen *Kapazität* der Leiter. Die Definition von **Kapazität** in ihrer Beziehung zu »elektrischer Menge« findet man in Art. 266, Vorlesung 21. Wir können jedoch schon hier bemerken, dass zwei isolierte Leiter von derselben Gestalt, aber von verschiedener Grösse, in Bezug auf ihre elektrische *Kapazität* sich von einander unterscheiden; denn dem

grösseren muss eine grössere elektrische Menge mitgeteilt werden, damit seine Oberfläche in demselben Grade elektrisch wird. Man gebraucht in diesem Zusammenhange den Ausdruck *Potential* in folgendem Sinne: Eine gegebene Elektrizitätsmenge elektrisiert einen isolierten Körper bis zu einem gewissen, von seiner Kapazität abhängigen Potentiale (oder bis zu einer gewissen Kraft, elektrische Arbeit zu verrichten). Wird eine grosse *Elektrizitätsmenge* einem Leiter von geringer *Kapazität* mitgeteilt, so wird derselbe bis auf ein sehr hohes *Potential* elektrisiert; gerade so wie eine grosse Wassermasse, welche in ein enges Gefäss gegossen wird, die Wasserfläche bis auf ein hohes Niveau im Gefässe bringt. Die genaue Definition des Potentials, ausgedrückt durch die gegen die elektrischen Kräfte verbrauchte Energie, findet man in der Vorlesung über Elektrostatik (Art. 258).

Es wird sich als zweckmässig herausstellen, einen + elektrischen Körper als einen solchen zu bezeichnen, der auf ein *positives oder hohes Potential* elektrisiert ist; während man einen — elektrischen Körper als einen solchen ansehen kann, der auf ein *niedriges oder negatives Potential* elektrisiert ist. Und gerade so wie wir von dem Meeresniveau als Null-Niveau ausgehen, und danach die Höhe der Berge und die Tiefe der Bergwerke messen, indem wir das Meeresniveau als einen bequemen Ausgangspunkt für Niveauunterschiede benutzen, ebenso nehmen wir das Potential der Erdoberfläche (denn die Erdoberfläche ist immer bis zu einem gewissen Grade elektrisch) als *Null-Potential* und benutzen dasselbe als einen bequemen Ausgangspunkt, von wo wir Unterschiede des elektrischen Potentials messen können.

V. VORLESUNG: *Elektrisiermaschinen.*

41. Um sich grössere Vorräte von Elektrizität zu verschaffen als diejenigen sind, welche man durch Reiben eines Stabes von Glas oder Schellack erhält, hat man **Elektrisiermaschinen** konstruiert. Jede Elektrisiermaschine besteht aus zwei Teilen, von denen der eine zum Erzeugen, der andre zum Ansammeln der

elektrischen Ladungen dient. Die Erfahrung hat gelehrt, dass die Mengen positiver und negativer Elektrizität, welche durch Reiben an den Oberflächen der an einander geriebenen Körper erregt werden, von der Dauer des Reibens, der Grösse der geriebenen Oberflächen, und auch von der Natur der gebrauchten Körper abhängig sind. Wenn die beiden Körper, welche man an einander reibt, auf der in Art. 6 angegebenen elektrischen Liste nahe zusammen stehen, so ist die elektrische Wirkung ihrer gegenseitigen Reibung nicht so gross, als wenn man 2 in jener Reihe weit von einander getrennte Körper wählt. Um die grösstmögliche Wirkung zu erzielen, sollte man den am meisten + und den am meisten — Körper nehmen, die zur Konstruktion einer Maschine tauglich wären, und die grösste statthafte Oberfläche derselben der Reibung unterwerfen, indem man dafür sorgt, dass die beweglichen Teile einen hinreichenden mit der nötigen Geschwindigkeit vereinbaren Druck auf einander ausüben.

Die erste Form einer Elektrisiermaschine erfand Otto von Guericke in Magdeburg; dieselbe bestand aus einer an einer Spindel befestigten Schwefelkugel, welche mit der trockenen Handfläche während ihrer Rotation gerieben wurde. Mit dieser Vorrichtung entdeckte er die elektrischen Funken und die Abstossung gleichartig elektrisierter Körper. Isaac Newton ersetzte von Guericke's Schwefelkugel durch eine solche von Glas. Etwas später wurde die Form der Maschine durch verschiedene deutsche Elektriker verbessert; von Bose fügte einen Kollektor oder »Hauptkonduktor« hinzu, in Gestalt einer Eisenröhre, welche zum Zwecke der Isolierung von einer auf Harzkuchen stehenden Person getragen oder an seidenen Schnüren aufgehängt wurde; Winckler in Leipzig substituierte als Reibzeug statt der Hand ein ledernes Kissen; und Gordon in Erfurt gab der Maschine eine bequemere Konstruktion, indem er statt einer Glaskugel einen Glascylinder anwandte. Die Elektrizität wurde von dem elektrisierten Cylinder resp. der elektrisierten Kugel nach dem Hauptkonduktor längs einer Metallkette geführt, welche über die Kugel gehängt war. Ein mit Spitzen versehener Kollektor wurde erst nach Franklin's

berühmten Untersuchungen über die Wirkungsweise der Spitzen angewandt. Um das Jahr 1760 konstruierten De la Fond, Planta, Ramsden und Cuthbertson Maschinen mit Glasscheiben statt der Cylinder. Alle Reibungs-Elektrisiermaschinen sind jedoch heutzutage veraltet; dieselben sind in den letzten Jahren vollständig von den modernen Influenzmaschinen verdrängt.

42. Die Cylinder-Elektrisiermaschine. Dieselbe besteht aus einem an einer horizontalen Achse befestigten Glascylinder, welcher durch eine Handhabe gedreht werden kann. Gegen den Cylinder wird von hinten ein ledernes, mit Pferdehaaren ausgestopftes Kissen gedrückt, dessen Oberfläche mit einem gepulverten Zink- oder Zinnamalgam überzogen ist. Ein an dem Kissen befestigter seidener Lappen bedeckt die obere Hälfte des Cylinders. Vor dem Cylinder befindet sich der »Hauptkonduktor«,

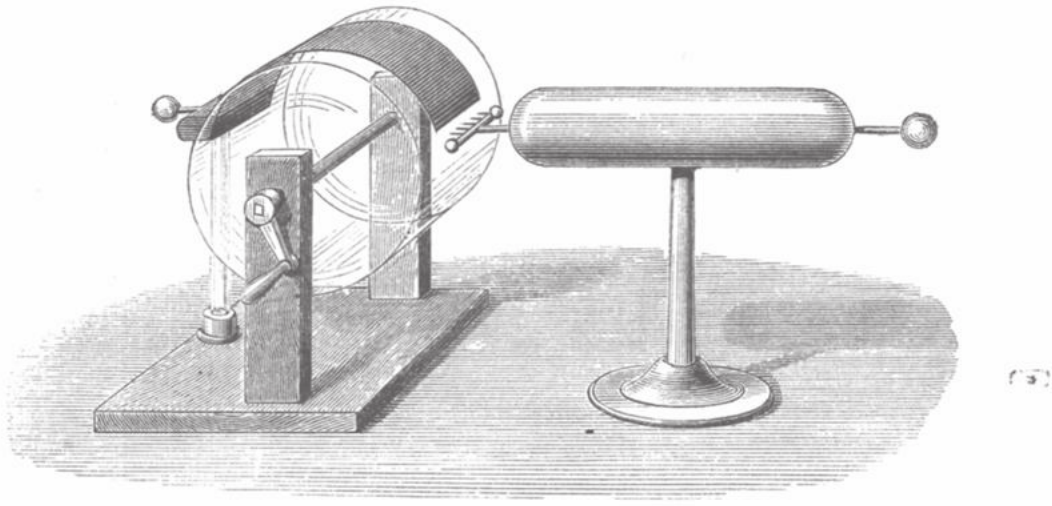


Fig. 29.

welcher aus Metall besteht, und gewöhnlich die Gestalt eines länglichen Cylinders mit halbkugelförmigen Enden hat; derselbe ruht auf einer Glasstütze. An dem dem Glascylinder nächsten Ende des Hauptkonduktors ist ein Stab befestigt, welcher eine Reihe feiner Metallspitzen trägt, dem Aussehen nach einem Rechen gleich; das andere Ende trägt gewöhnlich einen in einen Messingknopf auslaufenden Stab. Das Gesamtbild der Maschine zeigt Fig. 29. Wird der Handgriff gedreht, so erzeugt die Reibung zwischen dem Glase und der amalgamierten Oberfläche des Reibzeuges eine kräftige elektrische Aktion; und die Elektrizität

erscheint als + Ladung auf dem Glase, während auf dem Reibzeuge eine — Ladung zurückbleibt. Der Hauptkonduktor sammelt diese Ladung durch folgenden Vorgang an: Indem die + Ladung auf dem Glase im Kreise herumgeführt wird, wirkt sie induzierend auf den länglichen isolierten Konduktor, indem sie eine + Ladung nach dem entfernten Ende abstösst und auf dem nahen Ende eine — Ladung anzieht. Der Zweck der Spitzenreihe besteht darin, einen negativ elektrisierten Luftstrom (vergl. Art. 47) nach der anziehenden + Ladung auf dem Glase auszuströmen, welches dadurch neutralisiert wird; auf diese Weise kommt das Glas an das Reibzeug im neutralen Zustande und kann dann von neuem erregt werden. Diese Wirkung der Spitzen wird bisweilen, obgleich weniger richtig, so erklärt, dass man sagt, die Spitzen saugen die + Ladung aus dem Glase. Wenn man auch die — Ladung des Reibzeuges zu sammeln wünscht, muss das Kissen auf einer isolierenden Stütze ruhen und auf der Rückseite mit einem Metallknopfe versehen sein. Gewöhnlich benutzt man jedoch nur die + Ladung und verbindet das Reibzeig durch eine Kette mit der Erde, indem man auf diese Weise die — Ladung neutralisiert.

43. Die Scheiben-Elektrisiermaschine. Die Scheiben-Maschine konstruiert man, wie ihr Name andeutet, aus einer kreisförmigen Scheibe von Glas oder Ebonit und versieht dieselbe gewöhnlich mit 2 Paar Reibzeugen aus doppelten Kissen, welche die Scheibe zwischen sich reiben, und an ihrer höchsten und tiefsten Stelle angebracht sind. Dieselben sind mit Seidenlappen versehen, von denen jeder einen Quadranten des Kreises bedeckt. Der Hauptkonduktor ist entweder doppelt oder so gebogen, dass derselbe der Scheibe

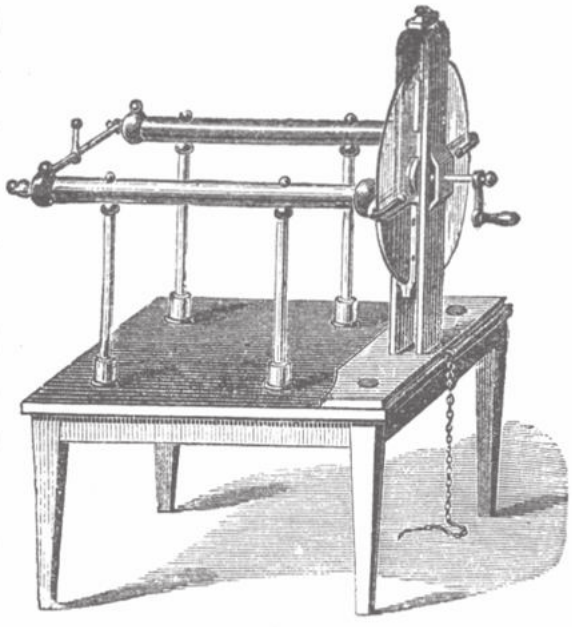


Fig. 30.

an beiden Enden ihres horizontalen Durchmessers ganz nahe ist; derselbe ist mit 2 Reihen Spitzen versehen, welche denselben Zweck haben, wie die Spitzenreihe bei der Cylindermaschine. Eine gebräuchliche Form der Scheibenmaschine zeigt Fig. 30. Die Wirkungsweise der Maschine ist in allen Punkten von theoretischem Interesse dieselbe, wie bei der Cylindermaschine. Ihre Vorzüge bestehen darin, dass eine grosse Glasscheibe leichter hergestellt werden kann als ein grosser Glascylinder von vollkommener Gestalt; und dass die Entfernung auf der Oberfläche des Glases zwischen den aufsammelnden Spitzen und den Rändern der Reibzeuge bei der Glasscheibe grösser ist, als bei dem Cylinder, vorausgesetzt, dass man beide Male gleich grosse Flächen reibt, denn es sei noch bemerkt, dass, nachdem die beiden auf diese Weise getrennten Ladungen bis zu einem gewissen Betrage angesammelt sind, eine Entladung längs dieser Oberfläche stattfindet, mithin deren Länge die Wirksamkeit der Maschine beschränkt. Bei einer neuern Konstruktion, welche wir Le Roy verdanken, und welche von Winter modifiziert wurde, hat man nur ein Reibzeug mit Lappen, die etwas mehr als einen Quadranten der Scheibe bedecken, und einen Kollektor mit doppelter Spitzenreihe, während der Hauptkonduktor aus einem ringförmigen Körper besteht.

44. Elektrisches Amalgam. Canton, welcher fand, dass Glas im hohen Grade elektrisiert wurde durch Eintauchen in trockenes Quecksilber, schlug vor, ein Amalgam von Zinn mit Quecksilber als geeigneten Ueberzug des Reibzeuges zu gebrauchen. Noch besser ist das Kienmayer'sche Amalgam, welches zu gleichen Teilen aus Zinn und Zink besteht, welche in geschmolzenem Zustande mit Quecksilber zusammengemengt werden (1 Teil Zinn, 1 Teil Zink, 2 Teile Quecksilber). Musivgold kann man ebenfalls gebrauchen. Diese Amalgame werden mit etwas steifem Fett auf die Kissen gestrichen. Sie haben den doppelten Zweck, die — Ladung wegzuleiten, welche während der Thätigkeit der Maschine auf dem Reibzeuge erzeugt wird, und als Reibzeug einen Stoff zu bieten, welcher noch mehr negativ (vergl. die

Liste in Art. 6) ist, als das Leder oder die Seide des Kissens selbst. Gepulverter Graphit ist ebenfalls gut.

45. Vorsichtsmassregeln beim Gebrauche der Elektrisiermaschinen. Verschiedene Vorsichtsmassregeln sind beim Gebrauche der Elektrisiermaschinen zu beobachten. Feuchtigkeit und Staub muss man sorgfältig vermeiden. Die Oberfläche des Glases ist hygroskopisch, und man muss daher, abgesehen von sehr trockenen Klimaten, die Glasflächen und das Reibzeug erwärmen, um den angesammelten Feuchtigkeitsüberzug zu entfernen. Gläserne, zur Isolation bestimmte Stützen können mit einer dünnen Schicht von Schellack oder (festem) Paraffin überzogen werden. Ein Paar Tropfen wasserfreien Paraffins (welches man erhält, wenn man ein Stückchen Natrium in eine Flasche mit Paraffin-Oel thut), welche man mittelst eines Flanelllappens an die vorher erwärmten Flächen bringt, verhüten den Feuchtigkeitsniederschlag. Eine Elektrisiermaschine, welche mehrere Monate nicht gebraucht wurde, erfordert einen neuen Amalgambezug ihres Reibzeuges. Dasselbe sollte gereinigt und erwärmt werden; eine dünne gleichmässige Schicht von Talg oder anderm steifen Fett wird darüber gestrichen, und das Amalgam, welches vorher zu feinem Pulver zerstossen wurde, wird auf die Oberfläche gesiebt. Trotz aller Vorsichtsmassregeln sind die Reibungselektrisiermaschinen bei feuchtem Wetter doch nicht ganz zuverlässig, und dies ist der Hauptgrund, weshalb dieselben jetzt von den Influenzmaschinen verdrängt worden sind; denn letztere braucht man nicht zu erwärmen.

Alle *Spitzen* sollte man bei Apparaten für Reibungselektrizität vermeiden, ausgenommen da, wo man sie besonders wünscht, wie z. B. die »saugenden« Spitzen am Hauptkonduktor, um eine elektrische Ladung abzuleiten. Alle Stäbe etc. bei Apparaten für Reibungselektrizität werden deshalb mit abgerundeten Knöpfen versehen.

46. Versuche mit der Elektrisiermaschine. Mit der Elektrisiermaschine lassen sich viele hübsche und interessante Versuche anstellen. Die Erscheinungen der *Anziehung und Ab-*

stossung können im grossen Massstabe zur Anschauung gebracht werden. Fig 31 stellt eine als **das elektrische Glockenspiel** bekannte Vorrichtung dar [1]), bei welchem 2 kleine, an seidenen Schnüren aufgehängte Metallkugeln in Bewegung gesetzt werden und gegen die Glocken anschlagen, zwischen denen sie aufgehängt sind. Die beiden äussern Glocken sind mittelst metallener Drähte oder Ketten an den Knopf der Maschine gehängt. Die dritte Glocke hängt an einem seidenen Faden, steht jedoch mit dem Erdboden durch eine Metallkette in Verbindung. Die Kugeln werden zuerst von den elektrisierten äussern Glocken angezogen, dann abgestossen, und nachdem sie sich an der nicht isolierten mittleren Glocke entladen haben, abermals angezogen, und auf diese Weise schwingen die Kugeln hin und her.

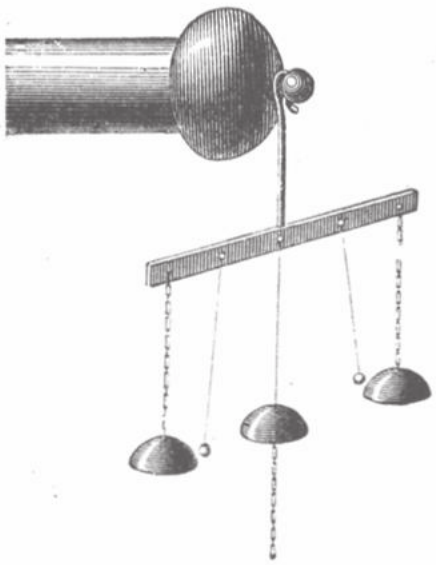


Fig. 31.

Bei einer andern Vorrichtung lässt man kleine, aus Mark geschnittene Figuren oder Puppen auf- und niedertanzen zwischen einer Metallplatte, welche horizontal am Knopfe der Maschine aufgehängt ist, und einer andern platten Scheibe, welche sich einige Zentimeter tiefer befindet und mit der Erde in Verbindung steht.

Eine andere beliebte Methode, die elektrische Abstossung zu zeigen, besteht darin, eine Puppe mit langen Haaren auf die Maschine zu stellen. Die einzelnen Haare stehen zu Berge, wenn die Maschine in Thätigkeit gesetzt wird, indem sie vom Kopfe und von einander abgestossen werden. Aehnlich verhält es sich mit einem Papiertroddel, den man an den Hauptkonduktor hängt. Die überraschendste Art aber, diese Erscheinung zu zeigen, ist die, eine Person auf einen Schemel mit gläsernen Beinen treten

---

1) Erfunden im Jahre 1752 von Franklin, um ihn von dem Vorhandensein atmosphärischer Elektrizität zu benachrichtigen, welche ein zugespitzter eiserner Stab aus der Luft über seinem Hause aufsog.

und sie den Knopf der Maschine berühren zu lassen; wird die Maschine in Thätigkeit gesetzt, so stehen die Haare der Person zu Berge, falls dieselben trocken sind. Auch Funken springen ohne weiteres von einer auf diese Weise elektrisierten Person zu einer auf dem Erdboden Stehenden über.

Durch die Funken der Maschine kann man Weingeist oder Aether in einem metallenen Löffel anzünden, der durch einen Draht mit dem nächsten in die Erde führenden metallischen Leiter verbunden ist. Ausströmendes Gas kann dadurch entzündet werden, dass man vom Finger einer, wie eben beschrieben, auf einem Isolierstuhle stehenden Person einen Funken nach dem Brenner überspringen lässt.

47. Wirkung von Spitzen; elektrischer Wind. Die *Wirkung von Spitzen*, Elektrizität von der Oberfläche eines Konduktors ausströmen zu lassen, kann man durch zahlreiche Versuche leicht beweisen. Ist die Maschine gut im Stande, und liefert sie 4 Zoll lange Funken, wenn man dem Knopfe den Knöchel nähert, so kann eine feine, zugespitzte Nadel, welche man am Konduktor anbringt, durch ihre Spitze die Elektrizität

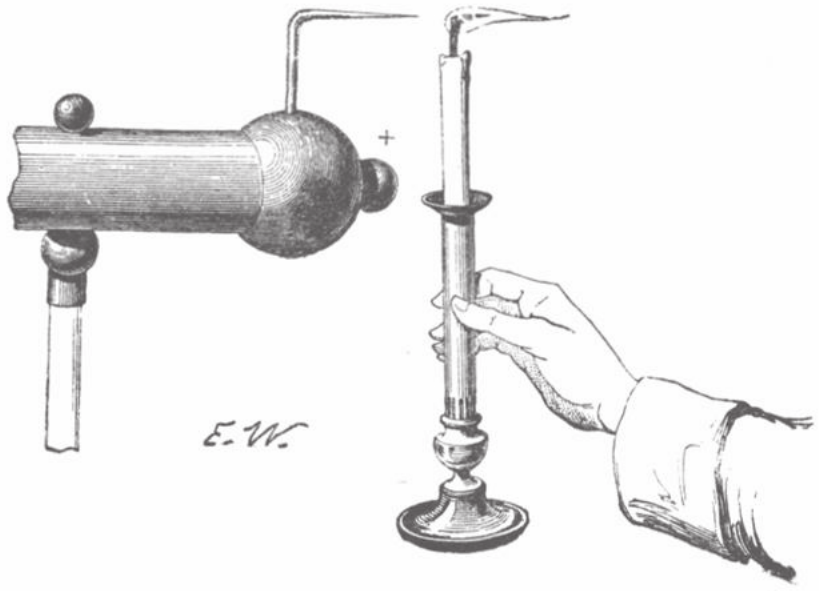


Fig. 32.

in so wirkungsvoller Weise entladen, dass man nur ganz kurze Funken aus dem Knopfe ziehen kann, während gleichzeitig ein feiner Strahl oder ein Büschel von blassblauem Lichte an der

Nadelspitze erscheint. Hält man eine angezündete Kerze vor dieselbe, so wird die Flamme durch die Strömung der von der Spitze abgestossenen elektrisierten Luft merklich zur Seite geblasen (Fig 32). Diese Luftströmungen kann man mit der Hand fühlen. Sie rühren von einer gegenseitigen Abstossung der elektrisierten Luftteilchen in der Nähe der Spitze und der auf der Spitze selbst angesammelten Elektrizität her. Diese *gegenseitige Abstossung* kann durch Hamilton's **elektrisches Flugrad** oder **elektrische Reaktionsmühle** (Fig. 33) nachgewiesen werden. Dieselbe besteht aus einem leichten Kreuze aus Metall oder Stroh, welches auf einem vertikalen Stifte ruht und dessen zugespitzte Enden rechtwinklig umgebogen sind. Stellt man dasselbe auf den Hauptkonduktor oder verbindet es mit demselben durch eine Kette, so treibt die abstossende Kraft zwischen der Elektrizität der Spitzen und derjenigen der unmittelbar davor befindlichen Luft das Rad herum, und zwar in einer Richtung, welche derjenigen entgegengesetzt ist, nach welcher die Spitzen umgebogen sind.

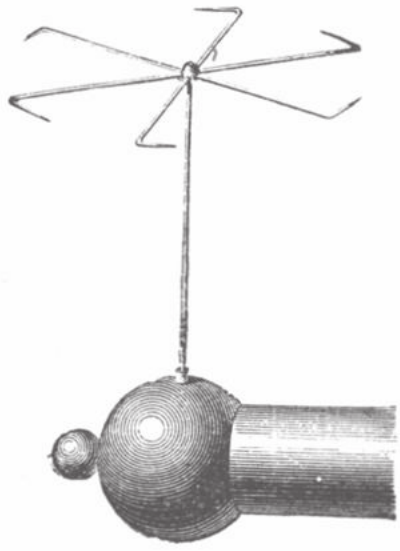


Fig. 33.

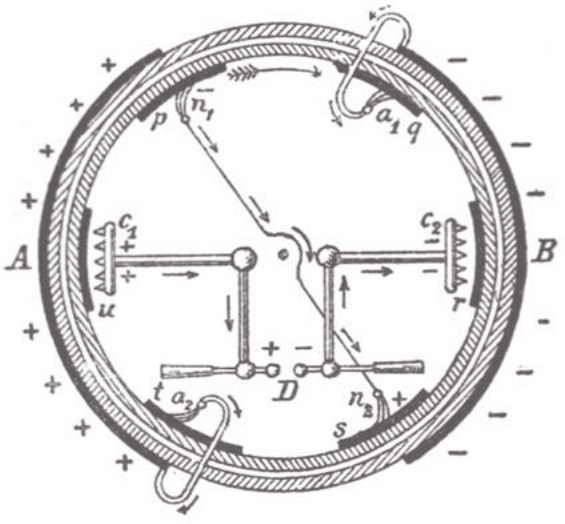
48. Armstrong's Dampf-Elektrisiermaschine. Die Reibung eines Dampfstrahles, welcher durch eine hölzerne Röhre aus dem Kessel strömt, erzeugt Elektrizität. In Wahrheit sind es die im Strahle verdichteten Wasserteilchen, welche diese Wirkung hervorbringen. W. Armstrong, welcher diese Elektrizitätsquelle untersuchte, konstruierte einen wirksamen Apparat, der unter dem Namen der **Dampf-Elektrisiermaschine** bekannt ist. Dieselbe kann ausserordentlich grosse Mengen von Elektrizität erzeugen und Funken von fünf bis sechs Fuss Länge geben. Der Kollektor besteht aus einer Reihe Spitzen, welche von den aus hölzernen Röhren strömenden Dampfstrahlen getroffen und nebst einer als Hauptkonduktor dienenden Metallkugel von einer gläsernen Säule getragen werden.

49. Influenz-Maschinen. Es giebt noch eine andre Klasse von Elektrisiermaschinen, welche sich gänzlich von den bisher beschriebenen unterscheiden und auf dem Prinzipe der Influenz beruhen. Man hat sie auch *Konvektion-Induktionsmaschinen* genannt, weil sie auf der Verwendung einer kleinen Anfangsladung beruhen, welche durch Influenz andere Ladungen erzeugt, die dann durch die beweglichen Teile der Maschine an eine andere Stelle *geführt* werden, wo sie die Anfangsladungen vermehren oder einem geeigneten Kollektor eine Zufuhr an Elektrizität mitteilen können. Unter diesen Apparaten ist der älteste der **Elektrophor**, welcher in der 3. Vorlesung zur Genüge erklärt wurde. Bennet, Nicholson, Erasmus Darwin und Andere erfanden Apparate, um durch Mechanismus das zu verrichten, was beim Elektrophor die Hand thut. Nicholson's Umdrehungs-Verdoppler (im Jahre 1788 erfunden) ist ein rotierender Apparat, bei welchem eine isolierte Verteilungswalze in die Nähe eines elektrisierten Körpers gebracht werden kann, dort einen Augenblick zur Berührung gelangt, so lange sie sich noch unter Influenz befindet, und dann mit ihrer aufgenommenen Ladung zu einem andern Körper geführt wird, dem sie ihre Ladung mitteilt, und welcher seinerseits induzierend auf sie wirkt und ihr eine entgegengesetzte Ladung mitteilt, welche die Verteilungswalze dann nach dem ersten Körper wieder überführt, und so dessen ursprüngliche Ladung bei jeder Rotation vermehrt.

Bei den neuern Influenzmaschinen kommen zwei Prinzipien zur Geltung: 1) Das Prinzip der *Influenz*, d. h. ein Konduktor, welcher ableitend berührt wird, so lange er sich noch unter Influenz befindet, erhält eine Ladung entgegengesetzter Art. 2) Das Prinzip der *gegenseitigen Verstärkung*. Dies bedarf einer genauen Erläuterung. Angenommen, A und B seien zwei isolierte Konduktoren, welche eine wenn auch noch so schwache Anfangsladung besitzen, A eine positive und B eine negative. Ferner werde ein dritter isolierter Konduktor C (*Träger* genannt) derart bewegt, dass er sich erst dem A, dann dem B, hierauf wieder dem A u. s. w. nähert. Wird C ableitend berührt, so

lange er sich noch unter Influenz der kleinen + Ladung von *A* befindet, so wird er schwach — elektrisch. Dann möge sich *C* weiter bewegen und diese — Ladung an *B* abgeben. Hierauf werde *C*, so lange er noch unter Influenz von *B* steht, ableitend berührt, so wird *C* schwach + elektrisch. Bei der Rückkehr nach *A* gebe *C* seine + Ladung an *A* ab und verstärke dadurch also die + Ladung des *A*. Die Folge ist, dass *A* jetzt kräftiger wirkt als vorher, und, falls die genannten Vorgänge sich wiederholen, werden die Ladungen von *A* sowohl als auch von *B* immer stärker. Jeder der beiden Konduktoren sammelt die Ladungen an, welche durch Influenz des andern entstehen. Dies ist die prinzipielle Wirkungsweise der fraglichen Maschinen. Die neuern Influenzmaschinen datieren von 1860, wo C. F. Varley ein Modell mit 6 Trägern konstruierte, welche auf einer rotierenden Glasscheibe angebracht waren. Dann folgten 1865 die Maschine von Holtz und die von Töpler, und 1867 die des Lord Kelvin (der Replenisher); die neuesten Konstruktionen verdanken wir James Wimshurst.

50. Diagramm der Maschine. Bevor wir einige besondere Modelle beschreiben, wollen wir ein allgemeines Diagramm der Maschine besprechen, bestehend aus zwei festen *Belegen A* und *B*, welche eine +, resp. — Ladung erhalten sollen, und aus einer Reihe von *Trägern*, welche an einer rotierenden Scheibe *(Armatur)* befestigt sind. Fig. 34 giebt eine schematische Ansicht der wesentlichen Teile. Um die Zeichnung zu vereinfachen, sind die Metallbelege *A* und *B* so gezeichnet, als ob sie an der äussern Seite eines feststehenden äussern Glascylinders angebracht wären, und die 6 Träger *p q r s t u* derart, als ob sie auf der innern Seite eines innern rotierenden



Eig. 34.

Cylinders sässen. Die wesentlichen Teile sind nun folgende:

1) Ein Paar Belege A und B

2) Eine Reihe von rotierenden Trägern $p\ q\ r\ s\ t\ u$.

3) Ein Paar *neutralisierende Bürsten* n_1 und n_2, bestehend aus biegsamen Metalldrähten, welche die Träger ableitend berühren, so lange diese noch unter Influenz der Belege stehen. Sie sind durch einen *Querkonduktor*, welcher nicht isoliert zu werden braucht, mit einander verbunden.

4) Ein Paar *Zufuhrbürsten* a_1 und a_2, welche von den Belegen ausgehen und bis an die Träger reichen. Diese Bürsten sollen die von den Trägern weiter geführten Ladungen aufnehmen und dieselben den Belegen zuführen.

5) Den bisher genannten Teilen (welche zur Konstruktion einer selbsterregenden Maschine vollständig ausreichen) fügt man gewöhnlich noch einen *Entladungsapparat* hinzu, welcher aus zwei Kämmen C_1 und C_2 besteht. Dieselben sollen diejenigen Ladungen aus den Trägern aufsaugen, welche diese bei ihrem Durchgange bei den Zufuhrbürsten nicht abgegeben haben. Diese Kämme stehen mit den verstellbaren Entladungskugeln bei D in leitender Verbindung.

Die Maschine arbeitet nun in folgender Weise: Die neutralisierenden Bürsten werden zunächst so eingestellt, dass sie die beweglichen Träger in dem Augenblicke berühren, wo diese den Influenzbereich der Belege verlassen. Angenommen, der Beleg A hätte eine wenn auch noch so schwache + Ladung, so erhält der Träger p, welcher gerade im Augenblicke seines Durchgangs von n_1 berührt wird, eine schwache — Ladung, welche er nach der Zufuhrbürste a_1 mitnimmt, so dass B auf diese Weise schwach — elektrisch wird. Dasselbe bewirkt jeder Träger, wenn er sich (in der Zeichnung oben) von links nach rechts bewegt. In derselben Weise wird jeder Träger, wenn er sich (in der Zeichnung unten) von rechts nach links bewegt, von n_2 berührt, und zwar, so lange er noch unter Influenz der — Ladung des B steht. Deshalb wird er dem A durch die Zufuhrbürste a_2 eine kleine + Ladung zuführen. So wird A in

kurzer Zeit stark + und B stark — elektrisch. Je stärker aber diese Ladungen werden, um so mehr werden die Kämme C_1 und C_2 von denjenigen Ladungen aufsaugen, welche die Träger vorher

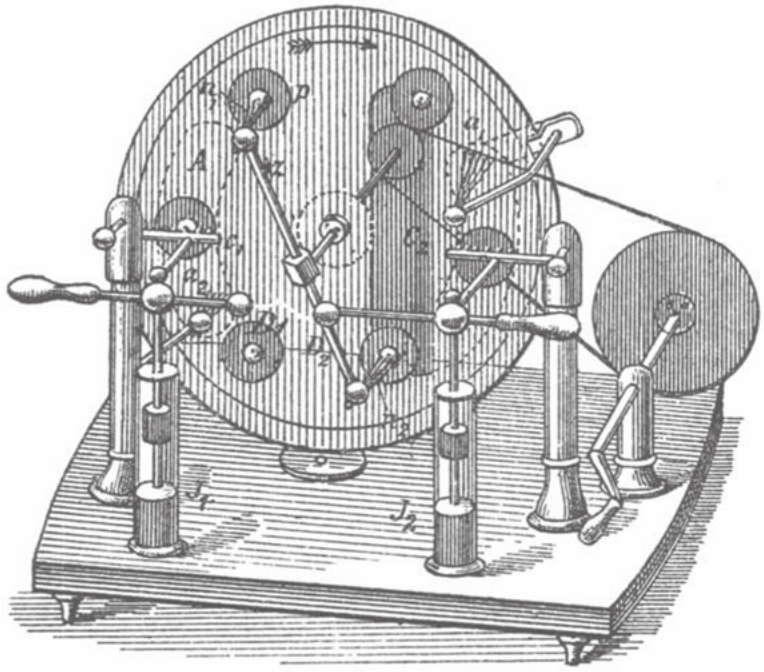


Fig. 35.

nicht haben abgeben können. Die Folge davon ist, dass elektrische Funken zwischen den Entladungskugeln bei D überspringen.

Die Maschine ist nur dann selbsterregend, wenn sowohl die neutralisierenden, als auch die Zufuhrbürsten einen guten metallischen Kontakt haben. Wäre der Entladungsapparat bei C_1 und C_2 nicht mit Spitzenkämmen, sondern mit Kontaktbürsten versehen, so könnte der Fall eintreten, dass in dem Augenblicke, wo ein längerer Funken zwischen den Entladungskugeln überspringt, die Belege ihre Ladungen verlieren oder sogar eine der ursprünglichen entgegengesetzte erhalten.

Es ist zu beachten, dass sich zwischen den festen Belegen und den rotierenden Trägern zwei Glasschichten befinden. Das Glas dient nicht allein als Stütze für die Metallteile, sondern hat auch den Zweck, eine Rückentladung (durch Funken oder elektrischen Wind) zu verhüten, welche etwa beim Durchgange der Träger von diesen zu den Belegen statt finden könnte.

Dies sind die wesentlichen Bestandteile, welche wir antreffen bei Varley's Maschine vom Jahre 1860, bei Lord Kelvin's

Replenisher (welcher nur 2 Träger hat) und bei vielen andern Maschinen, einschliesslich des unter dem Namen Clarke'scher Gasanzünder bekannten Apparates.

51. Töpler's Influenzmaschine. Bei dieser von Voss konstruierten Maschine sind verschiedene Einzelheiten berücksichtigt, welche von Holtz und andern herrühren. Ihre Konstruktion geschieht fast ganz nach dem soeben erörterten Diagramm; nur haben wir statt der beiden Cylinder zwei ebene Scheiben aus gefirnisstem Glase, eine feste und eine bewegliche, welch' letztere etwas kleiner ist und vor ersterer in Umdrehung gesetzt werden kann. (Fig. 36). Die *Belege A* und *B*

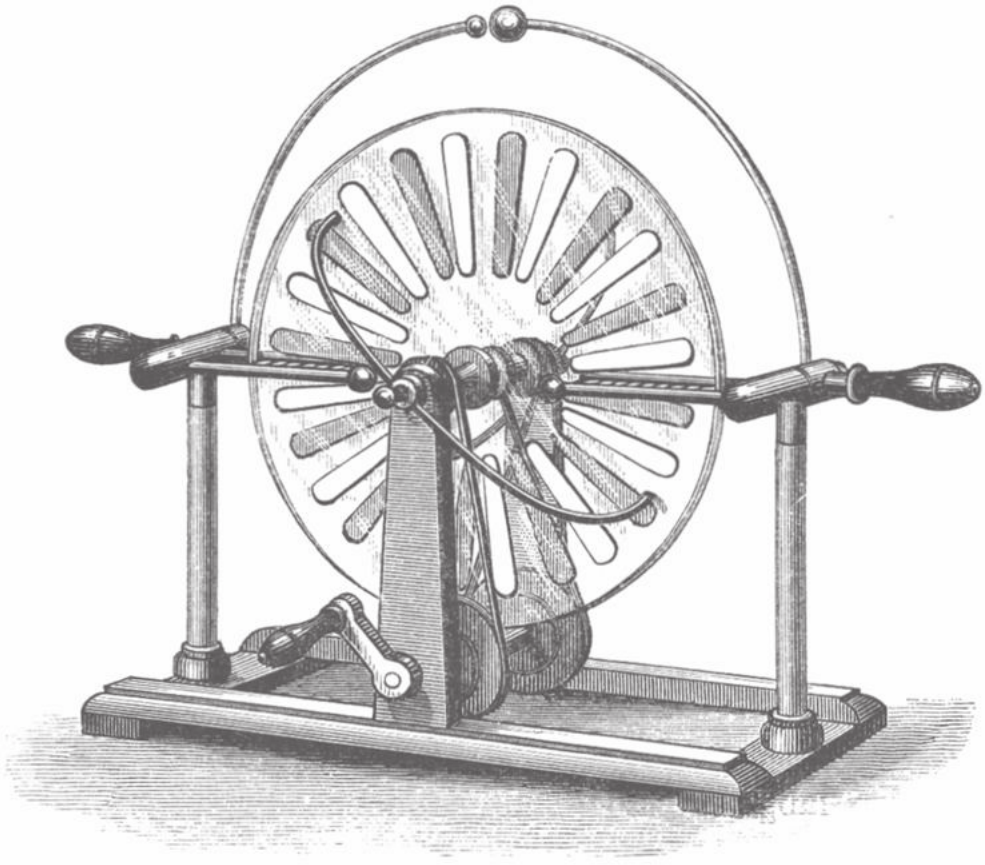


Fig. 36.

bestehen aus Stanniol, sind auf der Rückseite der festen Scheibe angebracht und mit gefirnisstem Papier überzogen. Die *Träger* sind kleine Scheiben oder Sektoren aus Stanniol, 6 bis 8 an der Zahl, und sind auf der vordern Seite der beweglichen Scheibe befestigt. Um zu verhüten, dass dieselben sich durch das Reiben der Bürsten abnutzen, ist in der Mitte jedes

Trägers noch ein kleiner Metallknopf angebracht. Die neutralisierenden Bürsten n_1 und n_2 bestehen aus dünnem elastischen Messingdraht und sitzen an den Enden eines Diagonalkonduktors Z. Die Zufuhrbürsten a_1 und a_2 sind ebenfalls aus dünnem Messingdraht und an zwei Armen befestigt, welche vom Rande der festen Scheibe ausgehen, so dass sie mit den beiden Belegen in metallischer Verbindung stehen. Die Saugkämme, deren Messingspitzen gerade so lang sind, dass die Träger noch an ihnen vorbei können, sind an isolierenden Säulen befestigt und stehen mit den verstellbaren Entladungskugeln D_1 und D_2 in Verbindung. Letztere ruhen auf zwei kleinen Leydener Flaschen J_1 und J_2, welche die Ladungen noch verstärken sollen, bevor eine Entladung stadt findet. Diese Flaschen sind in Fig. 37 besonders gezeichnet. Ohne dieselben geht die Entladung zwischen den Kugeln in Gestalt von vielen kleinen bläulichen Funken vor sich; bei Anwendung der Flaschen sind die Funken allerdings nicht so häufig, aber desto glänzender und lauter.

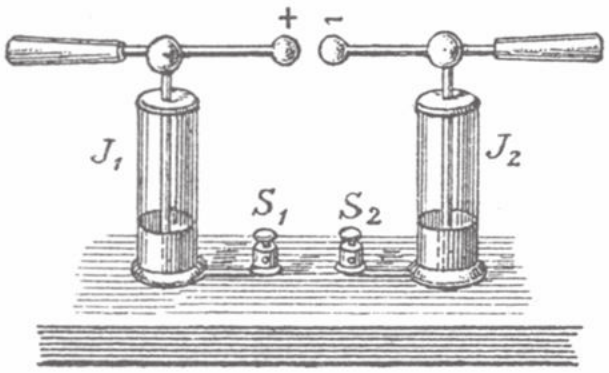


Fig. 37.

Beim Experimentieren mit der Töpler'schen (oder Voss'schen) Maschine stelle man zuerst alle 4 Bürsten so ein, dass sie mit den an ihnen vorbeigehenden Trägern einen guten metallischen Kontakt haben, und dass die neutralisierenden Bürsten die Träger berühren, so lange sie noch unter Influenz stehen. Darauf ziehe man die Entladungskugeln weit aus einander und setze die Scheibe in schnelle Rotation. Ist die Maschine rein, so muss sich dieselbe nach ein paar Umdrehungen selbst erregen, und man hört einen leisen, zischenden Ton, welcher durch innere Entladungen verursacht wird (im Dunklen als bläulicher Schimmer sichtbar). Gleichzeitig setzt die Maschine der Umdrehung einen grössern Widerstand entgegen. Bringt man die Kugeln einander näher, so springen Funken von einer zur andern über. Die Flaschen

müssen staubfrei gehalten werden; ihre erste Anwendung rührt von Holtz her. Bisweilen bringt man noch ein paar Endklemmen S_1 S_2 an, von denen jede mit der äussern Belegung einer der Flaschen in Verbindung steht. Dieselben eignen sich zum Einklemmen von Drähten, welche die Elektrizität weiter leiten, so dass man auch in grösserer Entfernung Versuche anstellen kann. Werden sie nicht zu diesem Zwecke benutzt, so muss man sie durch einen kurzen Draht mit einander verbinden, da die beiden Flaschen nur dann gehörig wirken, wenn ihre äussern Belege mit einander verbunden sind.

52. Influenz-Maschine von Wimshurst. Diese Maschine, welche von allen am häufigsten zur Anwendung kommt, besitzt keine festen Belege. Sie besteht in ihrer einfachsten Form (Fig. 38)

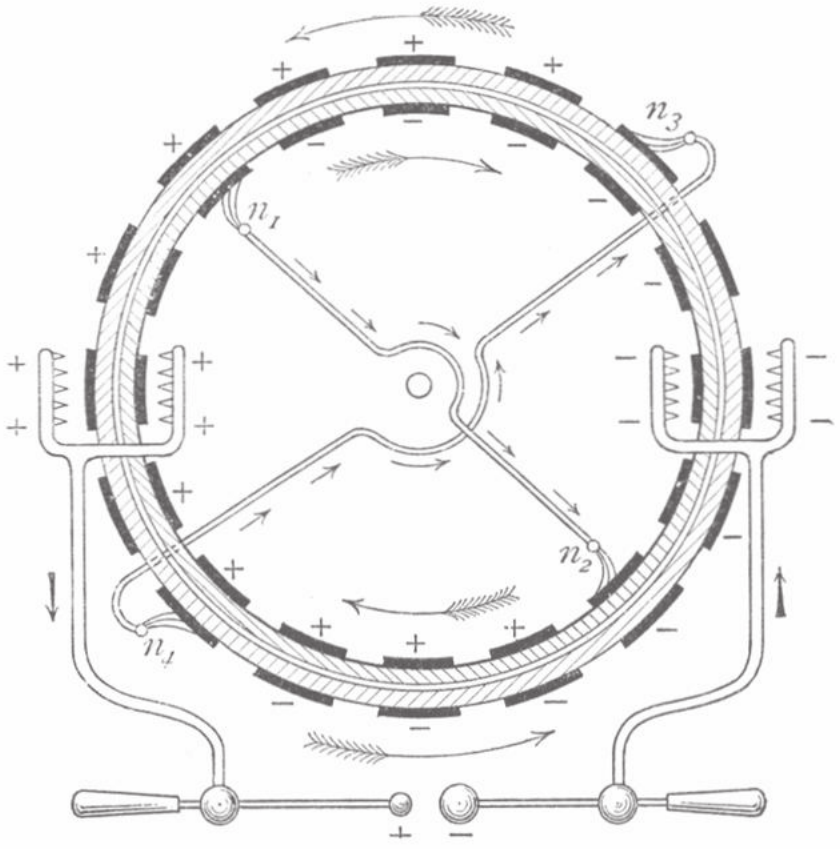


Fig. 38.

aus zwei kreisförmigen, gefirnissten Glasscheiben, welche in entgegengesetzter Richtung rotieren. Auf den äussern Seiten der beiden Scheiben sind eine Reihe von Sektoren befestigt, welche aus Metallfolie bestehen, und welche gleichzeitig als Träger und

als Induktoren dienen. Vor der vordern Scheibe ist ein nicht isolierter Diagonalkonduktor befestigt, dessen neutralisierende Bürsten die Sektoren dieser Scheibe bei ihrem Durchgange berühren. Die Sektoren der hintern Scheibe werden ebenfalls von den Bürsten eines zweiten Diagonalkonduktors berührt, der jedoch schräg zum ersten steht. Dies genügt, damit die in Rotation gesetzte Maschine sich selbst erregt. Aus Zweckmässigkeitsgründen fügt man jedoch noch einen Ansammlungs- und Entladungsapparat hinzu. Derselbe besteht aus 2 Paaren isolierter Kämme, welche ihre Spitzen nach innen gegen die rotierenden Scheiben kehren, ohne dieselben jedoch zu berühren. Das eine Paar befindet sich rechts, das andere links, auf einer isolierenden Stütze von Ebenholz. Diese Saugkämme stehen mit 2 verstellbaren Entladungskugeln in Verbindung, welche sich oberhalb der Maschine befinden. Gewöhnlich fügt man auch noch ein Paar Leydener Flaschen hinzu, damit die Funken erst dann überspringen, wenn sich eine beträchtliche Ladung angesammelt hat.

Die Wirkungsweise dieser Maschine erklären wir am besten mit Hilfe eines Diagramms (Fig. 38), bei welchem der grössern Deutlichkeit wegen die beiden rotierenden Scheiben derart gezeichnet sind, als wären es zwei Glascylinder, von denen der eine sich innerhalb des andern befindet. Der innere Cylinder stellt dann die vordere, der äussere die hintere Scheibe dar. In den Figuren 37 und 38 rotiert die vordere Scheibe von links nach rechts, die hintere Scheibe von rechts nach links. Die neutralisierenden Bürsten n_1 n_2 berühren die vordern, n_3 n_4 die hintern Sektoren.

Angenommen nun, einer der hintern, auf der obern Seite der Zeichnung befindlichen Sektoren erhielte eine kleine + Ladung. Bewegt sich derselbe dann weiter nach links, so gelangt er der Stelle gegenüber, wo einer der vordern Sektoren die Bürste n_1 streift. Die Folge davon ist, dass der von n_1 berührte und unter Influenz stehende Sektor eine kleine — Ladung erhält, welche er weiter mit sich nach rechts führt. Gelangt dann dieser vordere Sektor mit seiner — Ladung an die der

Bürste n_3 gegenüberliegende Stelle, so wirkt er induzierend auf den hintern, von n_3 berührten Sektor; folglich erhält dieser hintere Sektor eine + Ladung, welche er weiter mit sich nach links führt. Auf diese Weise werden alle Sektoren nach und nach stark geladen, und zwar führen die vordern Sektoren — Ladungen von links nach rechts, die hintern Sektoren + Ladungen von rechts nach links. Auf der untern Hälfte des Diagramms wiederholen sich diese Vorgänge, aber in umgekehrter Weise. Denn berührt n_1 einen vordern Sektor, der unter der Influenz eines + geladenen hintern Sektors steht, so strömt eine abgestossene Ladung längs des Diagonalkonduktors nach n_2 und ladet dadurch den von n_2 berührten Sektor positiv. Demnach führen die vordern Sektoren (in der untern Hälfte der Zeichnung) bei ihrer Bewegung von rechts nach links + Ladungen mit sich fort, während die hintern Sektoren nach ihrer Berührung mit n_4 negative Ladungen von links nach rechts führen. Die Metallsektoren wirken demnach gleichzeitig als Träger und als Induktoren. Es ist klar, dass fortwährend + Ladungen nach rechts und — Ladungen nach links weiter geführt werden. An denjenigen Stellen, bis zu welchen entgegengesetzte Ladungen geführt werden, befinden sich die Saugkämme, welche mit den Entladungskugeln in Verbindung stehen. Diese müssen weit von einander entfernt werden, sobald die Maschine in Bewegung gesetzt wird, und dürfen erst dann einander genähert werden, wenn sich die Maschine erregt hat.

Bei grössern Wimshurst'schen Influenzmaschinen werden zwei, drei oder noch mehr Paare von entgegengesetzt rotierenden Scheiben aufgestellt, und das ganze mit einem Glasgehäuse bedeckt, um die Maschine staubfrei zu erhalten. Haben die neutralisierenden Bürsten einen guten metallischen Kontakt, so sind die Maschinen bei jeder Witterung selbsterregend. Maschinen, welche nicht mehr als 6 bis 8 Sektoren auf jeder Scheibe tragen, geben längere, aber spärlichere Funken, als diejenigen mit einer grössern Anzahl von Sektoren. Wimshurst selbst hat viele Influenzmaschinen entworfen, von den kleinsten, mit Scheiben von

nur 2 Zoll Durchmesser, bis zu jener in Süd-Kensington befindlichen, deren Scheiben 7 Fuss im Durchmesser haben.

Noch vor Wimshurst hat Holtz eine Maschine mit 2 entgegengesetzt rotierenden Glasscheiben konstruiert; diese führten aber keine Metallsektoren und die Maschine war nicht selbsterregend.

53. Die Influenzmaschine von Holtz. Diese Maschine hat folgende besonderen Einrichtungen. Auf der rotierenden Scheibe befinden sich keine Metallträger, und man kann deshalb die Maschine nicht in der bisherigen Weise laden, d. h. durch Berührung von Leitern, welche unter Influenz stehen. Die Belege A und B (Fig. 39), welche aus gefirnisstem Papier, einem Halbleiter, bestehen, sind auf der Rückseite der festen Glasscheibe angebracht. In dieser Scheibe befinden sich 2 Oeffnungen (Fenster), in welche 2 zugegespitzte, von den Belegen ausgehende Papierstreifen hineinragen; dieselben ersetzen die Zufuhrbürsten. Die Entladungskugeln befinden sich innerhalb des neutralisierenden Stromes und stehen mit ein paar Spitzen tragenden Metallkämmen in Verbindung, die vor der rotierenden Scheibe angebracht sind, den Belegen gegenüber. Ein Diagonalkonduktor war anfangs nicht vorhanden. Man beachte, dass die Kämme, welche gleichzeitig neutralisierend und saugend wirken, sich vor der rotierenden Scheibe befinden, während die Zuführungsstreifen auf der hintern Seite derselben Scheibe sind. Fig. 39 giebt eine Ansicht der Maschine von hinten. Die Maschine ist nicht selbsterregend. Man verfährt in folgender Weise: Nachdem man die beiden Entladungskugeln einander genähert hat, wird die vordere Scheibe in schnelle Rotation versetzt. Hierauf wird einem der Belege eine kleine Anfangsladung erteilt, entweder mit Hilfe eines geriebenen Glas- oder Hartgummistabes, oder mittelst einer Leydener Flasche. Dadurch ladet sich die Maschine von selbst. Man sieht bläuliche Funken aus den Kamm-

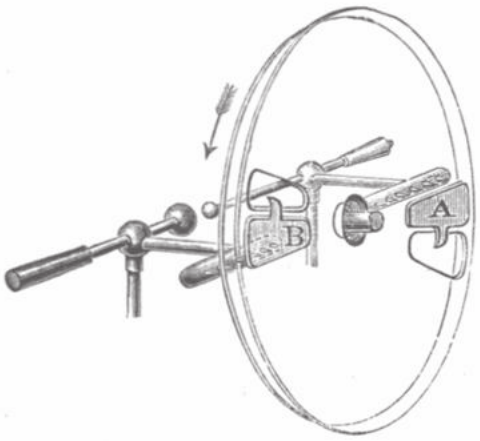


Fig. 39.

spitzen und aus den Papierstreifen ausströmen und vernimmt ein zischendes Geräusch. Entfernt man dann die Entladungskugeln von einander, so entsteht zwischen ihnen ein Funkenstrom. —

Hiernach ist es nun nicht schwer, die Wirkungsweise der Maschine zu verfolgen. Man beachte nur den Satz, dass die Oberfläche eines Nichtleiters, z. B. Glas, dadurch elektrisiert werden kann, dass man aus einer in der Nähe befindlichen Spitze einen elektrischen Wind gegen die Oberfläche ausströmen lässt (vergl. Art. 47). Angenommen, wir hätten dem Belege A eine kleine + Anfangsladung mitgeteilt. Diese wirkt durch Influenz auf die ihr unmittelbar gegenüberliegenden Metallteile, wodurch die Spitzen negativ elektrisch werden und deshalb einen negativ elektrischen Wind ausströmen, welcher die Oberfläche der rotierenden Scheibe ladet. Diese Ladung wird dann mit der Scheibe nach der andern Seite geführt, wo die Spitzen des zweiten Kammes dann also einen + elektrischen Wind ausströmen. Die zugespitzten Streifen, welche gegen die Rückseite der rotierenden Scheibe gerichtet sind, strömen ebenfalls Winde aus und sind stets bestrebt, der Rückseite der Scheibe eine solche Ladung zu erteilen, welche derjenigen entgegengesetzt ist, die auf der vordern Seite zu ihnen gelangt. Werden auf der vordern Seite negative Ladungen weiter geführt, so ist der Ansatzstreifen von B bestrebt, eine positive Ladung gegen die Rückseite auszuströmen, wodurch B stärker negativ elektrisch wird. Ebenso strömt der Ansatzstreifen von A einen — elektrischen Wind aus, und ladet A dadurch stärker positiv, so dass sich auf den beiden Belegen zwei entgegengesetzte Ladungen ansammeln. Diese Wirkung tritt nur dann ein, wenn die bewegliche Scheibe nach der entgegengesetzten Richtung rotiert, nach welcher die Ansatzstreifen zeigen.

Die Maschine von Holtz leidet an mehreren Mängeln. Ihre Wirkung hängt ganz von der Witterung ab; es kann vorkommen, dass sich die Ladungen plötzlich umkehren. Auch können die erwähnten elektrischen Winde, von denen schliesslich alles abhängt,

nur dann entstehen, wenn man der Maschine eine hinreichend starke Anfangsladung gegeben hat.

Neuerdings hat man Maschinen mit mehreren rotierenden Scheiben konstruiert, welche auf einer gemeinsamen Achse befestigt sind, und hat dann das Ganze mit einem Glasgehäuse umgeben, um den Zutritt von Feuchtigkeit zu verhüten. Bisweilen bringt man an der Achse auch noch eine kleine mit einem Reibzeug versehene Scheibe von Hartgummi an, um die Anfangsladung durch Reibung zu unterhalten. Holtz konstruierte z. B. eine Maschine mit 32 Scheiben, sowie eine andere mit 2 nach entgegengesetzten Richtungen rotierenden Glasscheiben.

Die Maschine von Holtz ist, wie jede andere Art von Influenzmaschinen, in ihrer Wirkung *umkehrbar*, d. h. werden den Belegen ununterbrochen beide Elektrizitäten (mit Hilfe einer zweiten Maschine) zugeführt, so wird die bewegliche Scheibe dadurch in Umdrehung versetzt.

Righi zeigte, dass die Maschine von Holtz einen konstanten Strom liefern kann, gerade so wie eine Volta'sche Batterie, und dass die Stromstärke annähernd der Umdrehungsgeschwindigkeit proportional ist. Er fand, dass die elektromotorische Kraft der Maschine bei jeder Geschwindigkeit gleich der von 52,000 Daniell Elementen, oder fast 53,000 Volt ist. Machte die Maschine 120 Umdrehungen in der Minute, so betrug der Widerstand 2810 Millionen Ohm; dagegen nur 646 Millionen Ohm, wenn 450 Umdrehungen in der Minute gemacht werden.

54. Versuche mit der Influenzmaschine. Die in Art. 43 beschriebenen Versuche sowie alle diejenigen, welche wir gewöhnlich mit den alten Reibungselektrisiermaschinen anstellen, einschliesslich des Ladens einer Leydener Flasche, lassen sich auch mit Hilfe der Influenzmaschinen zeigen. Bei einigen Versuchen ist es zweckmässig, eine der Entladungskugeln mit dem Erdboden in leitende Verbindung zu bringen und die Entladung von der andern Kugel zu nehmen. Um kleine mit verdünnter Luft angefüllte Glasröhren leuchten zu lassen, befestige man dieselben mittelst eines mit Guttapercha überzogenen Drahtes an

den Entladungskugeln oder auch an den Endklemmen S_1 S_2 (siehe Fig. 37). Die merkwürdige Eigenschaft der elektrischen Spitzenentladung, Staub oder Rauch aufzusaugen, lässt sich sehr einfach dadurch zeigen, dass man eine Nadel mittelst eines Drahtes in eine Glasglocke einführt. Letztere wird mit Rauch angefüllt, indem man innerhalb derselben ein Stück Magnesiumdraht oder Löschpapier verbrennt. Wenn man dann die Kurbel der Influenzmaschine bewegt, so schlägt sich der Rauch plötzlich nieder und die Luft ist wieder rein.

VI. VORLESUNG: *Die Leydener Flasche und andre Kondensatoren.*

55. In den vorhergehenden Vorlesungen wurde nachgewiesen, dass entgegengesetzte elektrische Ladungen einander anziehen; dass die Elektrizität nicht durch Glas hindurchströmen kann, dass sie jedoch *durch Glas hindurch* infolge von Influenz wirken kann. Zwei aufgehängte Hollundermarkkugeln, von denen die eine +, die andre — elektrisch ist, ziehen sich gegenseitig an durch die dazwischen befindliche Luft, auch wenn eine Glasscheibe zwischen sie gehalten wird, obgleich weder sie selbst, noch die elektrischen Ladungen auf ihnen durch das Glas hindurch können. Wenn man eine negativ elektrisierte Hollundermarkkugel in das Innere einer trockenen Glasflasche hängt, und ausserhalb einen geriebenen Glasstab hält, so bewegt sich die Hollundermarkkugel nach der dem Glasstabe nächsten Seite der Flasche, da sie von der ihr so genäherten + Ladung angezogen wird. Befestigt man mitten auf jeder Seite einer Glasscheibe ein Stück Zinnfolie und ladet das eine Stück +, das andre —, so ziehen sich beide Ladungen durch das Glas hindurch an, und sind dann nicht mehr frei. Stellt man die Scheibe aufrecht, so dass die Stücke von Zinnfolie den Tisch nicht berühren, so ergiebt sich, dass man durch blosses Berühren der Zinnfolie kaum irgend welche Elektrizität erhalten kann, denn die Ladungen sind durch ihre gegenseitige Anziehung **gebunden**; jede Ladung

wirkt induzierend auf die andre. Es stellt sich in der That heraus, dass diese beiden Stücke Zinnfolie auf diese Weise bei weitem stärker geladen werden können, als es der Fall sein würde, wenn jedes allein auf ein Stück Glas geklebt und dann elektrisiert würde. Mit andern Worten: *Die Kapazität eines Konduktors wird beträchtlich vergrössert, wenn derselbe in die Nähe eines mit der entgegengesetzten Elektrizität geladenen Konduktors gebracht wird.* Wenn seine Kapazität erhöht wird, so kann man demselben ein grösseres Quantum Elektrizität mitteilen, ehe er auf ein gleich hohes Potential gebracht wird. Deshalb kann man einen solchen Apparat, der dazu bestimmt ist, ein grosses Quantum Elektrizität zu fassen, einen **Kondensator** der Elektrizität nennen.

56. Kondensatoren. Angenommen nun, wir hätten 2 an isolierenden Stützen befestigte Metallscheiben A und B (Fig. 40) und zwischen ihnen eine Glasscheibe. B sei durch einen Draht mit dem Knopfe einer Elektrisiermaschine verbunden und A ebenfalls durch einen Draht mit der Erde. Die + Ladung auf B wirkt durch die Glasscheibe hindurch induzierend auf A, stösst die + Elektrizität zur Erde ab und lässt eine — Ladung auf der nächsten Seite von A zurück. Diese — Ladung auf A zieht die + Ladung von B auf die dem Glase zugekehrte Seite hin, und eine neue Zufuhr an Elektrizität kommt von der Maschine. Auf diese Weise wird dieser Apparat ein Kondensator. Werden die beiden Metallscheiben dicht an die Glasscheibe gerückt, so findet eine um so stärkere Anziehung zwischen der + und — Ladung statt, weil sie sich dann näher sind und die induzierende Kraft grösser ist; deshalb kann ein noch grösseres Quantum in den Metallscheiben angehäuft werden. Daraus erkennen wir, dass die Kapazität eines Kondensators erhöht wird, wenn man die Scheiben nahe zusammenbringt. Wenn man dann, während die Scheiben stark geladen sind, die

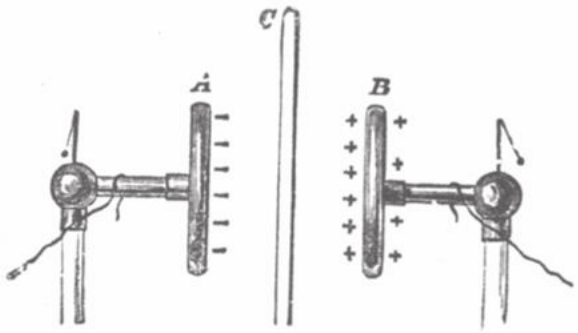


Fig. 40.

Drähte entfernt und die Scheiben auseinander rückt, so halten sich die beiden Ladungen nicht mehr so fest gebunden, und es befindet sich an ihren Oberflächen mehr *freie* Elektrizität als vorher. Dies erkennt der Experimentierende an den kleinen Hollundermarkkugel-Elektroskopen, welche an ihnen befestigt sind (man sehe die Figur), und welche aus einander fliegen, sobald man die Metallplatten von einander entfernt. Wir haben der Scheibe B keine weitere Ladung mitgeteilt und doch sollten wir aus dem Verhalten der Elektroskope schliessen, dass sie durch ihre Entfernung von der Scheibe A stärker elektrisiert worden wäre. Die Sache ist die, dass die *Kapazität* von B beträchtlich erhöht wurde, so lange der Konduktor B sich in der Nähe der — Ladung von A befand, dass aber die Kapazität von B abnahm, als B von A entfernt wurde, und deshalb wird jetzt B durch dasselbe Quantum Elektrizität stärker elektrisiert als vorher. Eine mit der Erde verbundene Platte in der Nähe eines isolierten Konduktors erhöht daher seine Kapazität und gestattet demselben eine grössere Ladung in sich anzuhäufen durch Anziehung und *Verdichtung* der Elektrizität auf der der Erdplatte zugekehrten Seite, so dass die Oberflächen-Dichte auf dieser Seite also sehr gross ist. Deshalb nennt man die Vorrichtung passend einen Kondensator. Früher war auch der Name *Akkumulator* in Gebrauch; doch wendet man diesen Ausdruck heutzutage nur noch bei einer besondern Art von Batterieen an, welche die Energie elektrischer Ströme ansammeln (Vorl. 48).

Eine *Luftschicht* zwischen den beiden Scheiben genügt auch schon, um die beiden Ladungen von einander zu isolieren. Die auf diese Weise durch eine Luftschicht getrennten Metallscheiben bilden einen **Luftkondensator.** Solche Kondensatoren wurden zuerst von Wilke und Aepinus konstruiert. Bei diesen Versuchen wirken die Glasplatte oder die Luftschicht als *dielektrische Körper* (Art. 290), indem sie den elektrischen Induktionskräften durch sie hindurchzuwirken gestatten. Alle dielektrischen Körper sind Isolatoren; aber Körper, die gleich gute Isolatoren sind, sind darum noch nicht notwendig auch gleich gute die-

lektrische Körper. Luft und Glas sind bei weitem bessere Isolatoren als Ebonit oder Paraffin, insofern als sie viel schlechtere Leiter sind. Doch ist die Influenz durch eine Glasplatte stärker, als durch eine gleich dicke Platte von Ebonit oder Paraffin, und durch diese wieder stärker, als durch eine Luftschicht. Mit andern Worten: Glas ist ein besserer **dielektrischer** Körper, als Ebonit oder Paraffin oder Luft, da es eine grössere induktive Kapazität besitzt. Man wird demnach bemerken, dass beim Laden eines Kondensators auf der einen Seite ebenso viel Elektrizität ausströmt, wie auf der andern einströmt.

57. **Verschiebung.** Wenn elektrische Kräfte auf einen dielektrischen Körper wirken, indem sie die Elektrizität auf der einen Seite zu- und auf der andern Seite abzuleiten bestrebt sind, so können wir uns in der Richtung der Kraftwirkung Kraftlinien durch den dielektrischen Körper gezogen denken, und können kanalförmige Räume als mit solchen Kraftlinien angefüllt betrachten. Wir stellen uns vor, dass ein Kraftkanal auf der einen Seite von einem bestimmten Stück der + geladenen Oberfläche und auf der andern Seite von einem Teil der — geladenen Oberfläche begrenzt wird. Diese Grenzen können von verschiedener Grösse und Gestalt sein, doch sind die Mengen von positiver und negativer Elektrizität auf beiden gleich gross. Diejenige elektrische Menge, welche durch den Kanal hindurch überführt wird, nennt Maxwell die *Verschiebung*. Bei Nichtleitern ist sie der elektromotorischen Kraft proportional. In Leitern werden durch elektromotorische Kräfte Ströme erzeugt, welche als solche Verschiebungen betrachtet werden können, die mit der Zeit fortwährend wachsen. Bei gewissen krystallinischen Medien findet die Verschiebung nicht genau in der Richtung der elektrischen Kraft statt; in diesem Falle können wir daher eher von Influenzkanälen als von Kraftkanälen reden. Unter Kanaleinheit verstehen wir denjenigen Kanal, dessen Enden durch die positive oder negative Einheit begrenzt werden. Das ganze elektrische Feld zwischen einem + und einem — geladenen Körper kann in solche Kanäle zerlegt gedacht werden.

58. Kapazität eines Kondensators. Hieraus geht hervor, dass die Kapazität eines Kondensators abhängt:

1) Von der Grösse und Gestalt der Metallplatten oder Metallbelege,
2) von der Dicke der dielektrischen Schicht zwischen ihnen, und
3) von der dielektrischen Kapazität des Körpers.

59. Die Leydener Flasche. Die Leydener Flasche, so genannt nach der Stadt, wo sie erfunden wurde, ist eine bequeme Form eines Kondensators. Sie besteht gewöhnlich aus einer Glasflasche (Fig. 41), welche auf der innern wie äussern Seite bis zu einer bestimmten Höhe mit Zinnfolie überzogen ist. Ein starker Metalldraht, welcher an seinem obern Ende einen Metallknopf trägt, führt durch einen Deckel aus trockenem, gut gefirnisstem Holze in das Innere des Gefässes und steht durch eine kleine, schlaffe Metallkette mit der innern Metallbelegung in Verbindung. Um die Flasche zu laden, hält man den Knopf an den Hauptkonduktor einer Elektrisiermaschine, indem man dabei die äussere Belegung entweder mit der Hand anfasst oder durch einen Draht oder eine Kette mit der Erde verbindet. Wenn auf diese Weise der innern Belegung eine + Ladung mitgeteilt wird, so wirkt dieselbe induzierend auf die äussere Belegung, zieht eine — Ladung auf die das Glas berührende Seite der äussern Belegung, und stösst eine + Ladung auf die Aussenseite der äussern Belegung ab, und von dort durch die Hand oder den Draht in die Erde. Nach kurzer Zeit hat die Flasche ihre volle Ladung erhalten, indem die äussere Belegung —, die innere + geladen ist. Wenn die Flasche aus gutem Glase angefertigt ist und trocken und staubfrei, so behält sie ihre Ladung Stunden, ja Tage lang. Wenn jedoch ein Weg vorhanden ist, auf welchem die sich gegenseitig anziehenden Elektrizitäten sich vereinigen können,

Fig. 41.

so thun sie dies, und die Flasche entladet sich dann augenblicklich. Wenn man die äussere Belegung mit der einen Hand anfasst und den Knöchel der andern dem Knopfe der Flasche nähert, so springt ein heller Funke vom Knopfe auf den Knöchel mit lautem Knall über und die Muskeln der Handgelenke, Ellbogen und Schultern spüren in demselben Augenblicke einen krampfhaften Schlag. Ein sicheres Mittel, die Flasche zu entladen, bietet die **Entladungszange** oder der **Auslader** (Fig. 42), welcher aus einem mit Scharnier versehenen Metallstabe besteht, an dem Metallknöpfe und ein gläserner Handgriff angebracht sind. Den einen Knopf hält man gegen die äussere Belegung, während der andre dann dem Knopfe der Flasche genähert wird. Ein heller, schallender Funke, der von Knopf zu Knopf springt, zeigt an, dass die beiden angehäuften Elektrizitäten sich vereinigt und dadurch die Entladung bewirkt haben. Bisweilen entladet sich eine Flasche selbst, indem ein Funken über den obern Rand der Flasche hinweg geht. Auch vernimmt man häufig bei einer stark geladenen Flasche ein zischendes Geräusch, eine Folge von teilweisen Entladungen, welche über den Rand hinweg statt finden. Im Dunkeln kann man dieselben als schwach phosphoreszierende Ströme wahrnehmen.

Fig. 42.

60. Entdeckung der Leydener Flasche. Die Entdeckung der Leydener Flasche schreibt sich her von dem Versuche Musschenbroek's und seines Schülers Cuneus[1]), welche das sogenannte elektrische Fluidum in einer halb mit Wasser gefüllten Flasche sammeln wollten, die in der Hand gehalten wurde und mit einem Nagel versehen war, welcher das Fluidum von der Elektrisiermaschine durch den Kork zu dem Wasser leiten sollte. Hier diente das Wasser als innere und die Hand

1) Die Ehre der Entdeckung wird auch für den Prälaten Kleist von Camin in Anspruch genommen.

als äussere Belegung der Flasche. Als Cuneus den Nagel berührte, erhielt er einen Schlag. Diese zufällige Entdeckung erregte in Europa und Amerika die grösste Bewunderung.

61. Das Residuum oder der elektrische Rückstand. Wenn eine Leydener Flasche geladen und entladen wird, und dann eine Zeit lang sich selbst überlassen bleibt, so ergiebt sich, dass man beim abermaligen Entladen einen zweiten kleinen Funken bekommt. Es existiert in der That eine **zurückgebliebene Ladung** (Residuum), welche von dem Glase aufgesogen oder absorbiert zu sein scheint. Die Wiederkehr des Residuums wird beschleunigt, wenn man die Flasche ab und zu berührt. Die Menge des Residuums ist verschieden je nach der Zeit, die nach der Entladung der Flasche verstrichen ist; hängt auch von der Glassorte ab, aus welcher die Flasche verfertigt ist. In einem Luftkondensator kann man, wenn derselbe einmal entladen ist, kein Residuum entdecken.

62. Batterieen von Leydener Flaschen. Eine grosse Leydener Flasche giebt einen stärkern Schlag, als eine kleine, denn sie kann eine grössere Ladung aufnehmen; ihre Kapazität ist grösser. Eine aus *dünnem* Glase verfertigte Leydener Flasche hat als Kondensator eine grössere Kapazität als eine dicke Flasche von gleicher Grösse. Ist jedoch das Glas zu dünn, so wird die Flasche, wenn sie stark geladen wird, durch einen das Glas durchbohrenden Funken unbrauchbar. Gehärtetes Glas wird weniger leicht durchbrochen als gewöhnliches Glas, und deshalb können Leydener Flaschen, welche aus jenem gefertigt sind, entsprechend dünner sein und trotzdem eine grössere Ladung aushalten. Um das Durchbohren der Flasche durch einen Funken zu verhüten, muss man den obern Rand der innern Belegung mit dem mittleren Konduktor durch einen Streifen Folie oder durch eine Metallscheibe verbinden.

Soll eine Flasche *lange Funken* geben, so müssen die beiden Belegungen durch eine breite Fläche gefirnissten Glases von einander geschieden sein.

Wenn man jedoch eine sehr grosse elektrische Ladung an-

zuhäufen wünscht, so muss man mehrere Flaschen benutzen, und alle ihre innern Belegungen mit einander verbinden, und ebenso alle ihre äussern. Diese Anordnung heisst eine **Batterie von Leydener Flaschen** oder eine Leydener Batterie (Fig. 43). Da dieselbe eine grosse Kapazität hat, so ist eine grosse Elektrizitätsmenge erforderlich, um sie völlig zu laden. Geladen kann sie dann sehr kräftige Wirkungen hervorbringen; ihre Funke durchbohrt Glas ohne Weiteres, und man muss sich sehr in acht

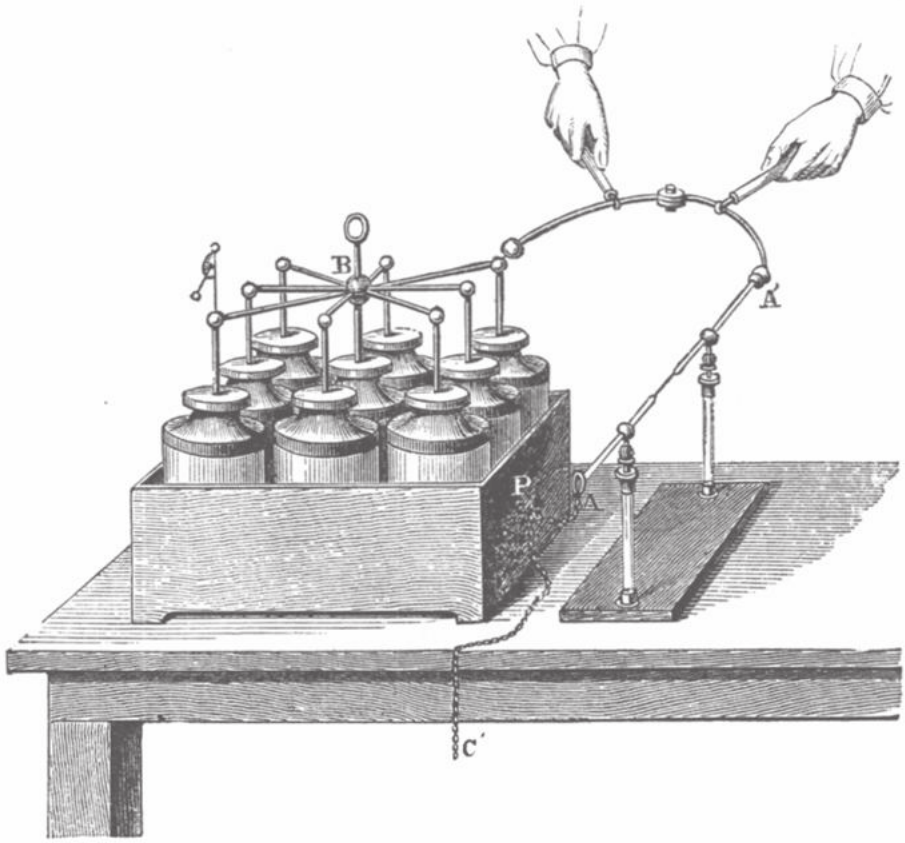


Fig. 43.

nehmen, dass der vom Funken herrührende Schlag nicht durch den Körper hindurchgeht, da derselbe tödlich sein könnte. Den Universal-Auslader, wie er bei der Leydener Batterie zur Anwendung kommt, zeigt die Figur.

63. Sitz der Ladung. Benjamin Franklin entdeckte, dass die Ladungen der Leydener Flasche in Wirklichkeit an der Oberfläche des Glases und nicht an den Metallbelegungen hafteten. Dies bewies er mittelst einer Flasche, deren Belegungen weggenommen werden konnten, Fig. 44. Die Flasche wurde

geladen und auf eine isolierende Unterlage gestellt. Die innere Belegung wurde dann in die Höhe gehoben und die Glasflasche aus der äussern Belegung herausgenommen. Doch keine Belegung war irgendwie elektrisch. Als die Flasche jedoch wieder zusammen gesetzt wurde, war sie wieder stark geladen. Die Ladungen waren während der ganzen Zeit auf der innern und äussern Fläche des dielektrischen Glases geblieben.

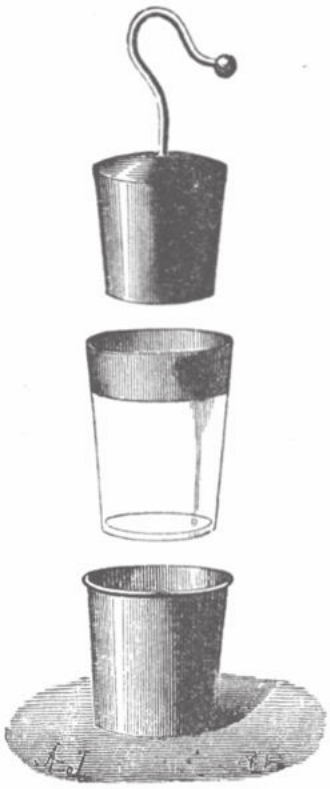


Fig. 44.

64. Dielektrische Spannung. Faraday bewies, dass das Medium, durch welches die Influenz stattfindet, in Wirklichkeit eine wichtige Rolle bei der Erscheinung spielt. Man weiss jetzt, dass alle dielektrischen Körper, durch welche Induktionskräfte wirken, dadurch *gespannt* werden[1]). Da ein gut luftleer gemachter Raum ein guter dielektrischer Körper ist, ist es klar, dass nicht notwendig die materiellen Moleküle des dielektrischen Körpers es sind, auf welche so eingewirkt wird; deshalb nimmt man an, dass die elektrischen Erscheinungen von den Druck- und Zugkräften und den Spannungen in dem sogenannten **Aether** herrühren, einem dünnen, feinen Medium, welches den ganzen Raum und alle Dinge durchdringt, und dessen höchst elastische Natur es befähigt, die Lichtschwingungen zu uns zu tragen, obgleich es viele Millionen mal dünner ist als die Luft. Da die Moleküle der Körper innig vom Aether umgeben sind, so teilen sich die Spannungen des Aethers auch den Molekülen der Körper mit, so dass auch diese eine Spannung erleiden. Das Glas zwischen den beiden Metallbelegungen bei der Leydener Flasche wird in der That zwischen den sich anziehenden elektrischen

1) In den exakten Wissenschaften bedeutet eine Spannung eine Veränderung der Gestalt oder des Volumens, herrührend von der Einwirkung eines *Stress*. Ein *Stress* ist die Kraft, der Druck oder irgend ein anderes Agens, welches eine Spannung erzeugt.

Ladungen gespannt oder gedrückt. Wenn eine isolierte, geladene Kugel in einem Zimmer aufgehängt wird, so wird eine ebenso grosse Menge der entgegengesetzten Elektrizität auf die innere Seite der Zimmerwände gezogen und die Luft zwischen der Kugel und den Wänden wird (elektrisch) **gespannt**, wie das Glas der Leydener Flasche. Wenn eine Leydener Flasche aus dünnem Glase angefertigt wird, so kommt es vor, dass sie unter der spannenden Kraft nachgiebt; und wenn eine Leydener Flasche entladen wird, so wird die Luftschicht zwischen dem Knopfe der Flasche und dem Knopfe des Ausladers um so mehr gespannt, je mehr dieselben sich einander nähern, bis zuletzt die spannende Kraft zu gross wird, so dass die Luftschicht nachgiebt und von dem Funken, welcher sich durch sie entladet, durchbohrt wird. Das Vorhandensein solcher spannenden Kräfte giebt uns eine Erklärung für die Residua der Leydener Flaschen, bei denen das Glas infolge seiner Zähigkeit sich nicht einmal von der Spannung, der es unterworfen war, erholt. Man darf nicht vergessen, dass die **elektrische Kraft durch den Raum hindurch wirkt infolge von Uebertragung der spannenden Kräfte in dem den Raum erfüllenden Medium.** In jedem Falle sammeln wir nicht Elektrizität, sondern *Energie* an. Es wird Arbeit verrichtet, wenn wir die Elektrizität von einer Stelle zur andern treiben, entgegen den Kräften, welche die Bewegung zu hindern suchen. Das Laden einer Leydener Flasche lässt sich mit dem Biegen einer Feder vergleichen, oder mit dem Hinaufpumpen von Wasser von einem niedrigen Niveau auf ein höheres. Beim Laden einer Flasche führen wir auf der negativen Seite genau so viel Elektrizität weg, wie wir auf der positiven zuführen, und hierbei wird Energie verbraucht. Diese aufgespeicherte Energie kommt dann bei der Entladung wieder zum Vorschein.

VII. VORLESUNG: *Weitere Quellen der Elektrizität.*

65. Am Schluss der ersten Vorlesung (Art. 12) bemerkten wir, dass **Reibung** keineswegs die einzige Quelle der Elektrizität ist. Wir wollen jetzt einige weitere Quellen aufführen.

66. Stoss. Ein heftiger Stoss zweier verschiedener Körper gegen einander erzeugt auf ihren Oberflächen Elektrizitäten entgegengesetzter Art. Man kann in der That eine Tabelle entwerfen, ähnlich der des Art. 6, in der Reihenfolge, dass jeder Körper, der von einem andern, weiter unten auf der Tabelle befindlichen gestossen wird, eine + Ladung erhält.

67. Vibration. Volpicelli zeigte, dass Schwingungen, die in einem mit Schwefel oder einer andern isolierenden Substanz überzogenen Metallstabe erregt wurden, eine Scheidung der Elektrizitäten an der Trennungsfläche des Metalls von dem Nichtleiter erzeugten.

68. Bruch und Spaltung. Wenn ein Kartenblatt im Dunkeln zerrissen wird, so bemerkt man Funken, und wenn man die getrennten Teile mit einem Elektroskop prüft, so findet man, dass dieselben elektrisch sind. Die mit Papier überzogene Leinwand, welche man zur Anfertigung von Papierkragen und starken Enveloppen gebraucht, zeigt dies recht deutlich. Wenn man im Dunkeln ein Stück Zucker mit den Zähnen zerbeisst, so bemerkt man bleiche Lichtflammen. Die plötzliche Spaltung einer Tafel von Glimmer bringt ebenfalls Funken hervor, und beide Platten zeigen sich elektrisch.

69. Krystallisation und Uebergang aus dem flüssigen in den festen Zustand. Viele Körper erweisen sich elektrisch, wenn sie aus dem flüssigen in den festen Zustand übergehen. Giesst man Schwefel auf eine Glasschale und lässt denselben erkalten, so wird derselbe stark elektrisch, was man erkennen kann, wenn man die krystallinische Masse mit einem Glasstabe aushebt. Chokolade wird ebenfalls beim Festwerden elektrisch. Wenn Arseniksäure aus einer Lösung in Chlorwasserstoffsäure heraus krystallisiert, so ist die Bildung beider Krystalle von einem Lichtblitz begleitet, der ohne Zweifel von einer elektrischen Entladung herrührt. Eine merkwürdige Erscheinung hat man, wenn man Kupfervitriol und Kalium in einen Schmelztiegel giesst. Es wird fest, ohne elektrisch zu werden; wenn es sich dann aber etwas abkühlt, so zerspringt die krystallinische Masse in Stücke unter augenblicklicher Elektrizitätsentwicklung.

70. Verbrennung. Volta zeigte, dass Verbrennung Elektrizität erzeugt. Ein Stück brennende Holzkohle oder eine brennende Räucherkerze, wie sie zur Räucherung gebraucht wird, bringt die Blätter eines Goldblattelektroskopes, mit dessen Knopfe sie verbunden ist, zum Divergieren.

71. Verdampfen. Das Verdampfen von Flüssigkeiten ist häufig mit Elektrizitätserregungen verbunden, wobei die Flüssigkeit und der Dampf sich mit entgegengesetzten Elektrizitäten laden, allerdings nur dann, wenn die Flüssigkeit in Wallung ist. Einige Tropfen einer Kupfervitriollösung, in einen heissen Schmelztiegel aus Platina gegossen, erzeugen bei ihrer Verdampfung eine starke Elektrizitätserregung.

72. Atmosphärische Elektrizität. Die atmosphärische Luft erweist sich stets elektrisch im Vergleich zur Erde. Diese Elektrizität rührt, zum Teil wenigstens, von der über dem Meere stattfindenden Verdunstung her. Die atmosphärische Elektrizität wird in der 25. Vorlesung besonders behandelt.

73. Druck. Eine grosse Zahl von Körpern werden, wenn sie zusammengedrückt werden, auf ihrer Oberfläche elektrisch. Kork z. B. wird + elektrisch, wenn man ihn gegen Bernstein, Guttapercha oder Metalle drückt; dagegen — elektrisch, wenn man ihn gegen Spat oder animalische Körper drückt. Peclet fand, dass die Stärke der Elektrizität, welche beim Reiben zweier Körper an einander erzeugt wird, nicht von dem Druck und der Grösse der Berührungsflächen, sondern von dem Material und der Geschwindigkeit, mit der die Körper an einander vorbei bewegt werden, abhängig ist. Rollende Berührung und gleitende Reibung hatten denselben Erfolg.

74. Pyro-Elektrizität. Es giebt gewisse Krystalle, welche an bestimmten Stellen oder Polen elektrische Ladungen aufweisen, wenn sie erhitzt oder abgekühlt werden. Krystalle, die durch Erhitzung oder Abkühlung elektrisch werden, nennt man **pyro-elektrisch.** Der hauptsächlichste von ihnen ist der **Turmalin**, dessen Eigenschaft, nach der Erhitzung leichte Körper an seinen Enden anzuziehen, schon Jahrhunderte lang bekannt

war. Derselbe wird von Theophrast und Plinius unter dem Namen *Lapis Lyncurius* erwähnt. Der Turmalin ist ein hartes Mineral, und in dünnen Platten durchscheinend, von dunkelgrüner oder brauner Farbe, im natürlichen Zustande jedoch vollkommen schwarz und undurchsichtig; derselbe hat die Eigenschaft, das Licht zu polarisieren. Man findet ihn für gewöhnlich in etwas unregelmässigen dreiseitigen Prismen, welche im vollkommenen Zustande an beiden Enden zugespitzt sind. Er gehört zu dem Hexagonal-System, ist jedoch bloss hemiedrisch, d. h. die Seiten sind nur abwechselnd entwickelt. Seine Gestalt ist in Fig. 45 abgebildet, wo man neben einer vollständigen Ansicht noch die beiden Enden A und B besonders dargestellt sieht. Man wird bemerken, dass diese beiden Enden etwas von einander verschieden sind. Jedes besteht aus drei schiefen, in eine Spitze auslaufenden Flächen. Aber bei A gehen die Kanten dieser Flächen nach den Ecken des Prismas, während bei B die Kanten der Endflächen nach den Mitten der Längsseiten des Prismas führen. Das Ende A ist als der **analoge**, und B als der **antiloge** Pol bekannt. Steigt die Temperatur des Krystalls, so zeigt A +, B — Elektrizität; lässt man jedoch den Krystall nach der Erhitzung wieder erkalten, so ist die Polarität die umgekehrte; denn während des Sinkens der Temperatur ist B + und A —. Ist die Temperatur konstant, so beobachtet man gar keine elektrische Wirkungen, weder bei hoher, noch bei niedriger Temperatur; auch hört die Erscheinung auf, wenn man den Krystall über 150° C. erhitzt. Dies rührt jedoch nicht davon her, dass der Krystall bei jener Temperatur ein Leiter wird; denn sein Widerstand ist selbst bei jener hohen Temperatur noch so gross, dass er in Wirklichkeit zu den Nichtleitern gehört. Ein erhitzter Krystall aus Turmalin, den man an einem seidenen Faden aufgehängt hat, kann von elektrischen Körpern oder einem zweiten erhitzten Turmalin angezogen oder abgestossen werden, wobei zwei gleiche Pole sich abstossen, während zwei ungleiche Pole sich anziehen. Wird ein Krystall zerbrochen, so besitzt jeder Bruchteil wieder einen analogen und einen antilogen Pol.

Viele andre Krystalle ausser dem Turmalin sind mehr oder weniger pyro-elektrisch. Zu ihnen gehören Zinksilikate (elektrischer Galmei), Boracit, Rohrzucker, Quarz, *neutrales weinsaures Kali*, schwefelsaures Chinin und andre mehr. *Boracit* krystallisiert in der in Fig. 46 abgebildeten Gestalt, welche einen

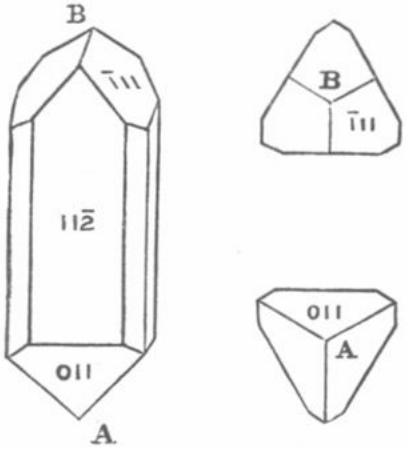


Fig. 45.

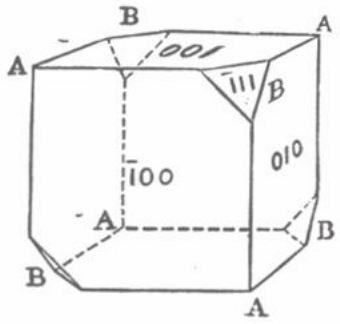


Fig. 46.

Würfel darstellt, der an 4 gegenüberliegenden Ecken abgestumpft ist. Die nicht abgestumpften Ecken verhalten sich wie analoge, die abgestumpften wie antiloge Pole. Wird ein hexagonales Prisma aus Quarz erhitzt, so zeigen seine 6 Kanten abwechselnd + und — Elektrizität.

75. Piezo-Elektrizität. Einige Krystalle lassen sich durch Druck nach einer gewissen Richtung elektrisieren. Hauy fand, dass ein Krystall von Kalkspat, zwischen den trockenen Fingern längs der stumpfen Kanten gedrückt, elektrisch wurde, und dass er seine Elektrizität einige Tage lang behielt. Er machte auch den Vorschlag, einen gepressten, aufgehängten Krystall als Elektroskop zu benutzen. Eine ähnliche Eigenschaft schreibt man dem Glimmer, dem Topas und dem Flussspat zu. Wenn man zwei gegenüberliegende Kanten eines 6-seitigen Quarzprismas zusammenpresst, so wird die eine +, die andere — elektrisch. Durch Druck werden auch entgegengesetzte Elektrizitäten an den entgegengesetzten Enden eines Krystalls von Turmalin erzeugt, sowie auch bei einigen andern Krystallen, welche in ihrer Struktur die Eigentümlichkeit der Quersymmetrie oder Hemiedrie aufweisen. Diesen Teil der Wissenschaft nennt man *Piezo-Elek-*

trizität. Quersymmetrie in der Struktur hängt bekanntlich von der molekularen Beschaffenheit ab und ohne Zweifel sind die pyro-elektrischen und piezo-elektrischen Eigenschaften, ebenso wohl wie das optische Verhalten dieser Krystalle im polarisierten Lichte eine Folge jener Eigentümlichkeit.

76. Tierische Elektrizität. Verschiedene Arten von im Wasser lebenden Tieren besitzen die Eigenschaft, auf physiologischem Wege elektrische Entladungen zu erzeugen. Am meisten bekannt von ihnen sind der *Torpedo*, der *Gymnotus* und der *Silurus*. Der **Raja Torpedo** [1]) oder elektrische Rochen, von welchem 3 Arten das Mittelländische Meer und den Atlantischen Ozean bewohnen, ist auf der Rückseite seines Kopfes mit einem elektrischen Organ versehen, wie es in Fig. 47 abgebildet ist. Dies Organ besteht aus dünnen, von polygonalen Zellen gebildeten Platten, 800 bis 1000 an der Zahl oder noch mehr, die mit 4 grossen Bündeln von Nervenfasern versehen sind. Die untere Seite des Fisches ist —, die obere + elektrisch. Bei dem **Gymnotus electricus** oder Surinam'schen Aal (Fig. 48) zieht sich das elektrische Or-

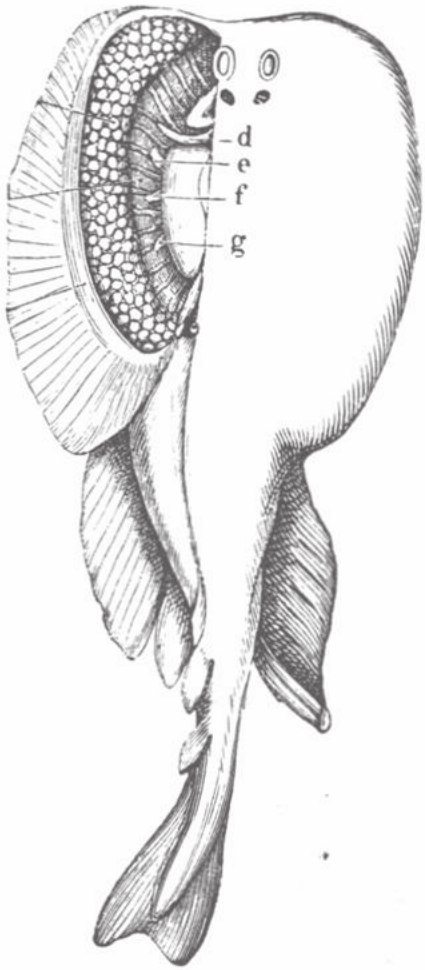


Fig. 47.

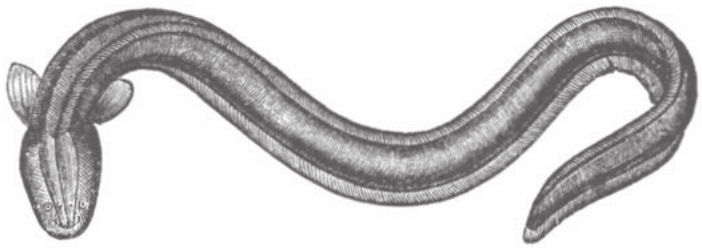


Fig. 48.

gan der Länge nach durch den ganzen Körper vom Schwanze

1) Es ist ein merkwürdiger Umstand, dass der arabische Name für torpedo, ra-ad, soviel bedeutet wie Blitz. Das ist jedoch vielleicht nicht so

bis zum Kopfe. Derselbe ist im Stande, einen höchst empfindlichen Schlag zu erteilen und ist ein furchtbarer Gegner, wenn er seine volle Länge von 5 bis 6 Fuss erreicht hat. Humboldt giebt uns eine lebhafte Schilderung der Kämpfe zwischen den elektrischen Aalen und den wilden Pferden, die von den Eingeborenen in die vom Gymnotus bewohnten Sümpfe getrieben werden. Bei dem Silurus fliesst der Strom vom Kopfe zum Schwanze.

Nobili, Matteucci und andre haben gezeigt, dass Nervenerregung und Muskelzusammenziehung auch beim Menschen schwache elektrische Ladungen zur Folge haben.

77. Elektrizität der Pflanzen. Buff glaubte Elektrizität zu entdecken, welche durch das Leben der Pflanze hervorgerufen würde; die Wurzeln und saftigen Teile seien — und die Blätter + elektrisch. Doch ist dies Gebiet noch wenig untersucht worden.

78. Thermo-Elektrizität. Wenn man zwei verschiedene, zusammengelötete Metalle an ihrer Verbindungsstelle *erwärmt*, so wird hier ein elektrischer Strom erzeugt. Dies Kapitel ist in der 35. Vorlesung unter *Thermo-elektrischen Strömen* behandelt.

79. Berührung ungleicher Metalle. Volta zeigte, dass die Berührung zweier ungleichen Metalle in der Luft entgegengesetzte Elektrizitäten erzeugte, indem die eine +, die andere — elektrisch wurde. Dieses bewies er auf verschiedene Art; einen der überzeugendsten Beweise lieferte er mit Hilfe seines *Kondensator-Elektroskopes*. Dasselbe bestand aus einem Goldblattelektroskop, mit welchem ein kleiner Kondensator verbunden war. Eine Metallplatte bildete den obern Teil des Elektroskopes, und auf sie war eine zweite, mit einem Handgriff versehene Metallplatte gesetzt, welche von der untern dadurch isoliert wurde, dass ihre Oberfläche sorgfältig gefirnisst war (Fig. 49). Da die Kapazität eines solchen Kondensators sehr gross ist, so kann eine sehr schwache Elektrizitätsquelle dem

---

merkwürdig, wie dies, dass die Electra in der Homerischen Erzählung gewisse Eigenschaften besitzen sollte, welche zu der Annahme berechtigten, sie wäre eine Personifizierung des Blitzes. Die Aehnlichkeit zwischen den Wörtern Elektra und Elektron (Bernstein) kann nicht zufällig sein.

Kondensator eine gewisse Menge Elektrizität zuführen, ohne dass sein Potential dadurch wesentlich erhöht oder die Goldblätter zum Divergieren veranlasst würden. Wird jedoch die obere Platte abgehoben, so nimmt die Kapazität der untern Platte beträchtlich ab und das Potential ihrer Ladung steigt, wie die Divergenz der Goldblätter anzeigt. Um mit dem Kondensator-Elektroskop zu beweisen, dass Berührung ungleicher Metalle Elektrizität erzeugt, nimmt man einen kleinen aus zwei ungleichen Metallen, z. B. Zink und Kupfer, zusammengelöteten Stab in die Hand, und berührt mit seinem einen Ende die untere Platte, während man die obere Platte mit dem Erdboden verbindet oder mit dem Finger berührt. Wenn die beiden entgegengesetzten Ladungen sich auf diese Weise in dem Kondensator angesammelt haben, entfernt man die obere Platte, und das Divergieren der Goldblätter lässt das Vorhandensein einer freien Ladung erkennen, welche dann nachher darauf hin untersucht werden kann, ob sie + oder — ist. Statt des Kupfer-Zink-Stabes lässt sich auch eine einzelne Volta'sche Zelle verwenden, welche man durch Kupferdrähte mit den beiden Platten verbindet. Lange Zeit wurde das Dasein dieser Berührungselektrizität in Abrede gestellt, oder vielmehr behauptete man, dass dieselbe (wenn sie in Volta'schen Verbindungen auftrat, wie sie in der 13. Vorlesung beschrieben sind) von chemischen Wirkungen herrühre; in Wirklichkeit jedoch rühren sowohl die Berührungselektrizität als auch die chemischen Vorgänge von den molekularen Beschaffenheiten der sich berührenden Körper her. Allerdings kennen wir bis jetzt noch nicht die genaue Natur derjenigen

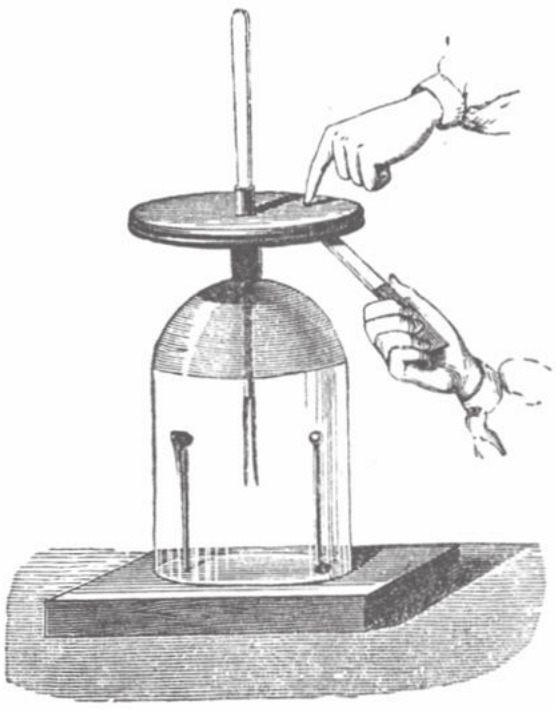


Fig. 49.

molekularen Beschaffenheiten, welche diese beiden Wirkungen zur Folge haben. Spätere Versuche, besonders die mit den empfindlichen Elektrometern von Kelvin angestellten, setzten die Richtigkeit der Entdeckung Volta's ausser Zweifel. Ein einfacher Versuch erklärt die befolgte Methode. Ein dünner Metallstreifen oder eine Metallnadel wird so aufgehängt, dass sie sich um einen Punkt C drehen kann. Durch eine bekannte Quelle wird sie elektrisiert. Unter sie stellt man zwei halbkreisförmige Scheiben oder Halbringe aus ungleichen Metallen (Fig. 50). Keiner von ihnen zieht die elektrisierte Nadel an oder stösst sie ab, bis die beiden Halbringe zur Berührung gebracht oder durch ein drittes Metall mit einander verbunden werden; in diesem Augenblicke dreht sich die Nadel, da sie von dem mit entgegengesetzter Elektrizität geladenen Metall angezogen und von dem mit derselben Elektrizität geladenen abgestossen wird.

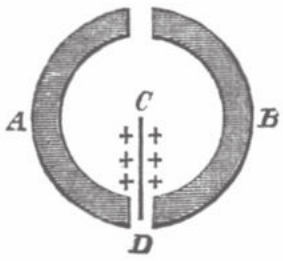


Fig. 50.

80. Kontaktreihe der Metalle (in der Luft). Volta fand ausserdem noch, dass die Differenzen des elektrischen Potentials zwischen den einzelnen Plattenpaaren nicht alle gleich gross waren. Während z. B. Zink und Blei nur höchst schwach +, resp. — elektrisch wurden, fand er, dass Zink und Silber bedeutend stärker +, resp. — elektrisch wurden. Er konnte die Metalle in einer Reihe so ordnen, dass jedes + elektrisch wurde, wenn es mit einem andern, weiter unten in der Reihe stehenden in Berührung kam. Die schräg gedruckten sind nach Beobachtungen, die nach Volta's Zeit angestellt wurden, hinzugefügt:

+ *Natrium.*	Kupfer.
Magnesium.	Silber.
Zink.	Gold.
Blei.	*Platin.*
Zinn.	— *Graphit (Kohle).*
Eisen.	

Obgleich Volta nur ganz rohe Näherungswerte gab, so sind die wahren numerischen Werte der Potentialdifferenzen für die

verschiedenen Metallpaare (in der Luft) doch erst in jüngster Zeit von Ayrton und Perry gemessen worden, deren Resultate sich z. T. in folgender Tabelle finden:

	Potentialdifferenz (in Volts)
Zink	
Blei	0,210
Zinn	0,069
Eisen	0,313
Kupfer	0,146
Platin	0,238
Kohle	0,113

Die Potentialdifferenz zwischen Zink und Kohle ist gleich der Summe aller dazwischen liegenden Potentialdifferenzen, also gleich 1,09 Volt [1]). Volta's Beobachtungen können daher in folgender allgemeiner Form zusammengefasst werden, welche als **Volta'sches Gesetz** bekannt ist: *Die Potentialdifferenz zweier beliebigen Metalle ist gleich der Summe der Potentialdifferenzen der in der Kontakt-Reihe zwischen ihnen stehenden Metalle.*

Es ist höchst wichtig zu bemerken, dass die Aufeinanderfolge der Metalle in der Kontakt-Reihe für Luft fast identisch ist mit derjenigen, wo die Metalle nach ihrer elektrochemischen Kraft geordnet sind, welche aus ihren chemischen Aequivalenten und ihrer Verbindungswärme mit Sauerstoff berechnet ist. (Man vergleiche die Tabelle im Art. 484). Hieraus scheint hervorzugehen, dass die Potentialdifferenz zwischen einem Metalle und der es umgebenden Luft ein Mass ist für das Streben jenes Metalls, an der Luft oxydieren. Wenn dies der Fall wäre, und wenn die Luft ein schlechter Leiter wäre (wie sie es in der That ist), während die Metalle gute Leiter sind, so müsste folgen, dass, wenn 2 verschiedene Metalle sich berühren, sie

1) In betreff der Definition für Volt, oder Einheit der Potentialdifferenz sehe man Art. 349.

ihre eigenen Potentiale durch Leitung ausgleichen, dagegen in den Luftschichten, welche sie unmittelbar umgeben, ungleiche Potentiale zurücklassen. Alle genauen Versuche, die bis jetzt angestellt wurden, haben nicht die Potentialdifferenz der Metalle selbst gemessen, sondern diejenige der beiden Luftschichten, welche die Metalle unmittelbar umgeben. Es steht fest, dass in der Luft Eisen sich positiv, dagegen in einer Atmosphäre von Schwefelwasserstoffgas sich negativ zum Kupfer verhält. John Brawn hat neuerdings auf frisch gesäuberten Metalloberflächen das Vorhandensein einer Feuchtigkeitsschicht nachgewiesen und gezeigt, dass poliertes Zink und Kupfer wie eine Batterie wirken, wenn die sie überziehenden Feuchtigkeitsschichten zur Berührung gebracht werden.

81. Eine Potentialdifferenz wird auch durch die Berührung *zweier verschiedener Flüssigkeiten* erzeugt. Eine *Flüssigkeit und ein Metall* zeigen bei ihrer Berührung ebenfalls eine Potentialdifferenz, und wenn das Metall sich chemisch in der Flüssigkeit aufzulösen anfängt, so tritt eine elektromotorische Kraft auf, welche vom Metall zur Flüssigkeit gerichtet ist.

Die thermo-elektrische Potentialdifferenz an der Verbindungsstelle zweier Metalle ist in Wirklichkeit eine Kontaktdifferenz. Sie wird durch die Wärmemenge gemessen (vergl. Art. 415), welche beim Durchgange eines elektrischen Stromes durch die Verbindungsstelle erzeugt wird in umgekehrter Richtung.

Wird ein *heisses* Metall mit einem *kalten* Stück von demselben Metall in Berührung gebracht, so wird ebenfalls eine Potentialdifferenz erzeugt, wobei die Scheidung der Elektrizitäten an der Berührungsstelle stattfindet.

Kürzlich zeigte Professor J. J. Thomson, dass die Berührungsfläche zwischen 2 Nichtleitern, wie z. B. Siegellack und Glas, der Sitz einer permanenten Potentialdifferenz ist.

82. Magnet-Elektrizität. Man kann die Elektrizität als Ströme, welche in Drähten fliessen, auch dadurch erhalten, dass man geschlossene, leitende Drähte in der Nähe von Magneten bewegt. Hiervon handelt Art. 217.

83. Rekapitulation. Wir haben in den vorhergehenden Artikeln gesehen, wie fast alle denkbaren Kräfte Elektrizität in den Körpern erzeugen können. Die hauptsächlichsten unter ihnen sind Reibung, Wärme, chemische Wirkung, Magnetismus und die Berührung ungleicher Körper. Wir bemerkten, dass die Elektrizitätserregung durch Reibung hauptsächlich von der molekularen Beschaffenheit der Oberflächen abhängt. Wir können hier noch hinzufügen, dass die Potentialdifferenz, welche durch die Berührung ungleicher Körper erzeugt wird, ebenfalls sich nach der Temperatur und der Beschaffenheit des Mediums (Luft, luftleerer Raum etc.) in welchem die Versuche angestellt werden, richtet. Ohne Zweifel hängt diese Quelle auch von den molekularen Beschaffenheiten der verschiedenen Körper ab, da die Moleküle an den Oberflächen von verschiedener Grösse und Gestalt sind und mit verschiedenen Geschwindigkeiten und verschiedenen Intensitäten schwingen. Es bestehen gute Gründe (Art. 10) für die Annahme, dass die Reibungselektrizität in Wirklichkeit von der Berührungselektrizität herrührt, welche successive an den einzelnen Stellen ihrer über einander hinbewegten Oberflächen erzeugt wird. Von den molekularen Beschaffenheiten der Körper jedoch, welche die Erregung der Elektrizität bestimmen, da wo sie in Berührung kommen, weiss man bis jetzt wenig oder nichts.

KAPITEL II.

MAGNETISMUS.

VIII. VORLESUNG: *Magnetische Anziehung und Abstossung.*

84. Natürliche Magnete. Der Name Magnet *(Magnes Lapis)* wurde von den Alten gewissen harten, schwarzen Steinen zuerteilt, welche man in verschiedenen Gegenden fand, besonders bei *Magnesia* in Kleinasien, und welche die Eigenschaft besassen, kleine Eisen-Stücke anzuziehen. Diese nach ihren Begriffen magische Eigenschaft machte den Magnetstein berühmt; doch erst im 10. oder 12. Jahrhundert entdeckte man, dass solche Steine die noch merkwürdigere Eigenschaft besässen, nach Norden, resp. Süden zu zeigen, falls man sie an einem Faden aufhing. Letztere Eigenschaft benutzte man bei der Schiffahrt [1]). Der natürliche Magnet ist ein Eisenerz, welches den Mineralogen unter dem Namen *Magnetit* bekannt ist, und die chemische Zusammensetzung $Fe_3\ O_4$ hat. Dieses Erz findet sich massenhaft in Schweden, Spanien, Arkansas, auf der Insel Elba und in andern Gegenden, allerdings nicht immer in magnetischem Zustande. Es tritt häufig krystallisiert auf, und dann gewöhnlich in regulären Oktaedern.

85. Künstliche Magnete. Wenn man ein Stück hartes Eisen mit einem natürlichen Magnete streicht, so findet man, dass dasselbe ebenfalls die charakteristischen Eigenschaften eines

---

1) Von jener Zeit erhielt der Magnet in England den Namen lodestone oder leading stone, d. h. leitender Stein.

Magnets erhalten hat; d. h. es zieht leichte Eisenteilchen an und zeigt, an einem Faden aufgehängt, nach Norden, resp. Süden. Savery zeigte zuerst im Jahre 1729, dass harter Stahl den Magnetismus eher behält, als gewöhnliches Eisen. In Fig. 51 und 52

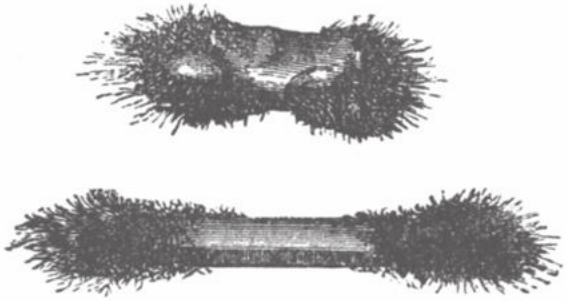


Fig. 51 und 52.

erblickt man einen natürlichen Magnet und einen künstlichen Stahlmagnet, welche beide in Eisenfeilspähne getaucht sind; letztere werden angezogen und bleiben in Büscheln haften.

86. Entdeckungen des Dr. Gilbert. Das vorstehende war nahezu Alles, was bis zum Jahre 1600 vom Magnet bekannt war. Da veröffentlichte Dr. Gilbert eine grosse Zahl von Entdeckungen auf dem Gebiete des Magnetismus in seinem berühmten Werke: *De Magnete.* Er beobachtete, dass die anziehende Kraft eines Magneten an zwei Stellen zu wohnen scheint, und in einem länglichen Magnet diese Stellen oder **Pole** sich gewöhnlich an den Enden finden. (Man sehe Fig. 51 und 52). Derjenige Teil des Magnets, welcher sich zwischen den Polen befindet, ist sichtlich weniger magnetisch, und zieht die Eisenfeilspähne nicht so stark an; und in der Mitte zwischen den Polen findet um den ganzen Magnet herum überhaupt keine Anziehung statt. Diese Stelle nannte Gilbert den **Aequator** des Magnets und eine die Pole verbindende Linie bezeichnete er als **Achse.**

87. Magnet-Nadel. Um die magnetischen Kräfte genauer zu untersuchen, gebraucht man eine **Magnetnadel.** Diese besteht (Fig. 53) aus einer leichten Stahlnadel, welche mit einem kleinen Hute von Messing, Glas oder Achat versehen ist, vermittelst dessen die Nadel auf eine scharfe Spitze gesetzt wird, so dass sie sich mit ganz geringer Reibung drehen kann. Durch Streichen

mit einem Magnet wird sie selbst zum Magnet gemacht. Nachdem sie auf diese Weise magnetisiert ist, stellt sie sich in die Nord-Süd-Lage, oder wie wir sagen, in den magnetischen Meridian (Art. 146). Der *Kompass*, welchen man vom Mechaniker kauft, besteht aus einer solchen über einer Windrose schwebenden Nadel.

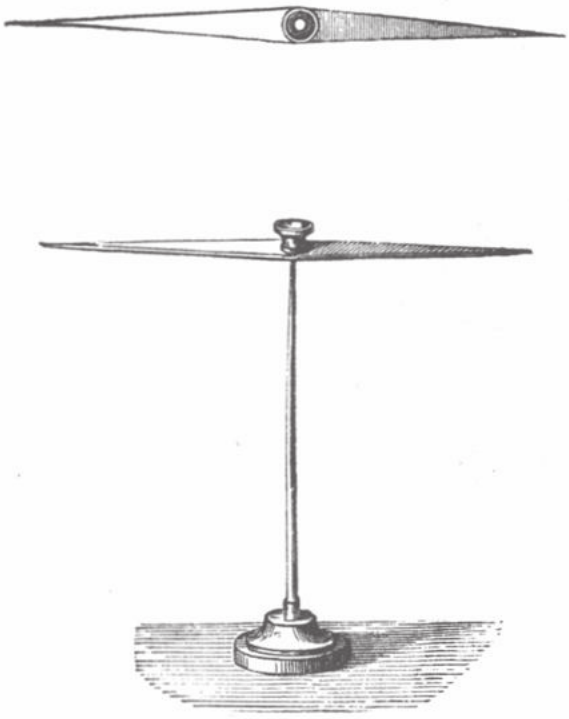


Fig. 53.

88. Magnetische Anziehung und Abstossung. Wenn wir einen natürlichen oder künstlichen Magnet in die Hand nehmen, und die beiden Pole desselben nach einander dem nach Norden zeigenden Ende einer Magnetnadel nähern, so bemerken wir, dass der eine Pol des Magnets die Nadel *anzieht*, während der andere sie *abstösst* (Fig. 54). Wenn wir den Versuch bei dem nach Süden zeigenden Ende der Magnetnadel wiederholen, so finden wir, dass dieselbe von dem einen Pole *abgestossen* und von dem andern *angezogen* wird; und dass derselbe Pol, welcher das nach Norden zeigende Ende der Magnetnadel abstösst, das nach Süden zeigende Ende anzieht.

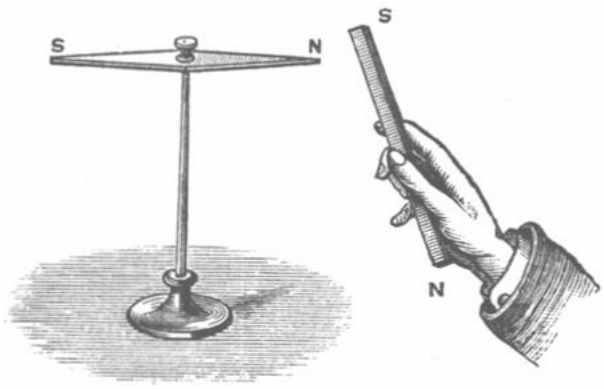


Fig. 54.

Wenn wir einen ähnlichen Versuch mit der Magnetnadel anstellen, und statt eines Magneten eine zweite magnetisierte Nadel gebrauchen, welche vorher auf eine Spitze aufgesetzt worden ist, und bei der wir das nach Norden zeigende Ende *markiert* haben, um dasselbe von dem nach Süden zeigenden Ende unterscheiden zu können, so stellt sich heraus, dass der nach Norden zeigende Pol den

nach Norden zeigenden Pol abstösst, und dass der nach Süden zeigende Pol den nach Süden zeigenden Pol ebenfalls abstösst; dass dagegen ein nach Norden zeigender Pol einen nach Süden zeigenden Pol anzieht und selbst von demselben angezogen wird.

89. Zwei Arten von magnetischen Polen. Daraus scheint hervorzugehen, dass es zwei entgegengesetzte Arten des Magnetismus giebt, oder jedenfalls zwei entgegengesetzte Arten von Magnetpolen, welche einander in genau derselben Weise anziehen oder abstossen, wie die beiden entgegengesetzten Arten der Elektrizität; die eine Art des Magnetismus scheint das Bestreben zu haben, sich nach Norden zu wenden, und die andere Art, nach Süden. Man hat den Vorschlag gemacht, diese beiden Arten des Magnetismus den Nordsuchenden und den Südsuchenden Magnetismus zu nennen; für unsern Zweck genügt es jedoch, zwischen den beiden Arten von Polen zu unterscheiden. In der gewöhnlichen Ausdrucksweise nennt man die Pole eines Magnets den Nordpol, resp. den Südpol, und diejenigen, welche Magnete anfertigen, bezeichnen gewöhnlich den nach Norden zeigenden Pol mit dem Buchstaben N. Derselbe heisst daher bisweilen der bezeichnete Pol, um ihn von dem nach Süden zeigenden oder nichtbezeichneten Pole zu unterscheiden. Um jeden Zweifel [1]) zu vermeiden, wollen wir denjenigen Pol eines Magnets, der, wenn der Magnet aufgehängt

---

1) Man muss in dieser Beziehung präzis sein, da in den vorhandenen Lehrbüchern sich manche Verwechslungen finden. Der Grund derselben ist folgender: Wenn der nach Norden zeigende Pol einer Nadel von dem am Nordpol der Erde befindlichen Magnetismus angezogen wird, so müssen nach dem Gesetze der Anziehung (dass ungleiche Pole sich anziehen) diese beiden Pole in der That entgegengesetzte Arten des Magnetismus haben. Welche Art sollen wir nun Nordmagnetismus nennen? Diejenige, welche sich am Nordpol der Erde findet? Dann müssten wir sagen, dass der nach Norden zeigende Pol der Nadel Südmagnetismus enthält. Und wenn wir diejenige Art Nordmagnetismus nennen, welche nach Norden zeigt, so müssten wir annehmen, dass der magnetische Pol am Nordpol der Erde Südmagnetismus in sich enthielte. In beiden Fällen stösst man auf Schwierigkeiten.

ist, das Bestreben hat, sich nach Norden zu kehren, den nordsuchenden Pol nennen, und den andern den südsuchenden Pol.

Wir können daher unsere Beobachtungen kurz so zusammenfassen: *Gleiche magnetische Pole stossen sich ab, ungleiche Pole ziehen sich an.* Dies können wir das erste Gesetz des Magnetismus nennen. Ebenso wie bei der elektrischen Anziehung und Abstossung geriebener Körper sind auch hier die magnetische Anziehung und Abstossung die Folge von Spannungen in dem umgebenden Medium, wie wir später sehen werden.

90. Die beiden Pole sind untrennbar. Es ist unmöglich, einen Magnet mit nur einem Pole herzustellen. Wenn wir ein Stück Stahldraht oder eine Uhrfeder magnetisieren, indem wir dieselben mit dem einen Pole eines Magnets streichen, so finden wir, dass der Draht, resp. die Uhrfeder doch 2 Pole haben, einen nordsuchenden und einen südsuchenden. Und wenn wir sie in zwei Teile zerbrechen, so hat jeder Teil wieder 2 Pole entgegengesetzter Art.

91. Magnetische Kraft. Die Kraft, mit welcher ein Magnet einen andern Magnet oder ein Stück Eisen oder Stahl anzieht oder abstösst, wollen wir *magnetische Kraft*[1]) nennen. Die von einem Magnet auf ein Stück Eisen oder einen andern Magnet ausgeübte Kraft ist nicht für alle Entfernungen dieselbe; je näher der Magnet ist, desto grösser ist die Kraft und umgekehrt. (Man sehe Art. 128.)

Jedesmal wenn eine Kraft zwischen zwei Körpern wirkt, wirkt sie auf beide und sucht beide zu bewegen. Ein Magnet zieht ein Stück Eisen an, und ein Stück Eisen zieht einen

---

Die Chinesen und Franzosen nennen den nach Norden zeigenden Pol der Nadel einen Südpol und den nach Süden zeigenden einen Nordpol. Kelvin nennt den nach Norden zeigenden Pol ebenfalls einen »wahren Südpol«. Die gewöhnliche Praxis schlägt jedoch den andern Weg ein, und nennt den nach Norden zeigenden Pol eines Magnets seinen Nordpol. Für Versuche färbt man die beiden Pole eines Magnets gewöhnlich mit verschiedenen Farben, und zwar den nordsuchenden Pol rot und den südsuchenden Pol blau.

1) Man sehe die Anmerkung über Kraft im Art. 164.

Magnet an. Die ; zeigte Isaak Newton , indem er einen Magnet auf einem Korke befestigte und ihn in einem mit Wasser gefüllten Bassin schwimmen liess (Fig. 55). Er fand , dass der Magnet sich auf dem Wasser fortbewegte, wenn er ihm ein Stück Eisen näherte. Eine auf solche Weise schwimmende Kompass-Nadel dreht sich im Kreise und zeigt nach Norden und Süden ; doch bewegt sich die Nadel als Ganzes weder nach Norden, noch nach Süden. Den Grund hierfür findet man weiter unten in Art. 129.

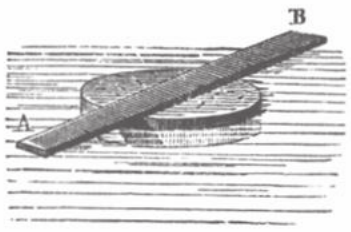


Fig. 55.

Gilbert schlug vor , die Kraft eines Magnets dadurch zu messen, dass man ihn ein an dem einen Arme einer Wagschale hängendes Stück Eisen anziehen lässt, während man in die Wagschale des andern Armes Gewichte legt ; und er fand dann, als er den *Magnet* an die Wagschale hing und das Stück *Eisen* darunter hielt, dass die hervorgebrachte Wirkung dieselbe war. Wirkung und Gegenwirkung sind daher für magnetische Kräfte gleich.

92. Magnetische Substanzen. Gilbert machte einen Unterschied zwischen *Magneten* und *magnetischen Substanzen.* Ein Magnet zieht nur an seinen Polen an , und diese besitzen entgegengesetzte Eigenschaften. Aber ein Stück Eisen zieht beide Pole des Magnets an , gleichviel , welcher Teil des Eisens dem Magnet genähert wird. Dasselbe hat keine unterscheidbaren festen Pole und keinen magnetischen Aequator. Ein wirklicher Magnet hat Pole , von denen einer von dem Pole eines andern Magnets *abgestossen* wird.

93. Andere magnetische Metalle. Durch spätere Versuche ist die Liste derjenigen Körper, welche von einem Magnet angezogen werden , vervollständigt. Ausser Eisen (und Stahl) hat man noch folgende Metalle als magnetisch erkannt:

Nickel, Chrom,
Kobalt, Cerium,

nebst einigen anderen. Doch nur Nickel und Kobalt sind mit Eisen und Stahl in Betreff der magnetischen Kraft überhaupt

zu vergleichen, und selbst diese stehen ihnen noch bedeutend nach. Andere Körper, verschiedene Eisensalze und andere Metalle, Papier, Porzellan und Sauerstoffgas, werden ebenfalls von einem kräftigen Magnet in schwachem Grade angezogen.

94. Diamagnetismus. Eine Anzahl von Körpern, namentlich Wismuth, Antimon, Phosphor und Kupfer werden von den Polen eines Magnets abgestossen. Solche Körper heissen *diamagnetisch*; etwas ausführlicheres über dieselben findet sich in der 29. Vorlesung.

95. Die Erde ein Magnet. Gilbert's wichtigste Entdeckung war die von dem der Erde innewohnenden Magnetismus. *Die Erde ist selbst ein grosser Magnet*, dessen Pole beinahe, jedoch nicht ganz, mit dem geographischen Nord- resp. Südpole zusammenfallen, und deshalb veranlasst die Erde einen frei aufgehängten Magnet, sich in die Nord-Südlage zu stellen. Gilbert liess einige natürliche Magnete in Kugelgestalt schneiden, um ein Modell der Erdkugel zu haben. Einen solchen kugelförmigen Magnet nannte er *Terrella*. Er fand, dass kleine Magnete sich den Polen der Terrella zuwenden, und eine geneigte Stellung annehmen, wie die Magnetnadel eines Kompasses. Die Lehre vom *Erdmagnetismus* findet sich in der 12. Vorlesung. Aus dem ersten Gesetze vom Magnetismus geht hervor, dass der magnetische Zustand des Nordpols der Erde dem des nordsuchenden Pols einer Magnetnadel entgegengesetzt sein muss. Daraus entsteht die auf Seite 93 angeführte Schwierigkeit.

96. Magnetische Induktion. Wir können einem Stücke Eisen Magnetismus mitteilen, ohne dasselbe wirklich mit einem Magnet zu berühren. Wenn wir einen kurzen, dünnen, nicht magnetischen Eisenstab neben etwas Eisenfeilspähne legen und ihm dann einen Magnet nähern, so wird durch die Nähe des Magnets in dem Eisenstabe Magnetismus *induziert*, und derselbe zieht jetzt die Eisenfeilspähne an (Fig. 56). Diese Induktions-Wirkung ist der in der 3. Vorlesung beschriebenen, welche stattfindet, wenn ein elektrischer Körper einem nichtelektrischen genähert wird, sehr ähnlich. Die Analogie geht in der That

noch weiter, denn wir finden, dass der auf diese Weise durch Induktion magnetisierte Eisenstab zwei Pole hat; der dem Pole des induzierenden Magnets nächste Pol ist von entgegengesetz-

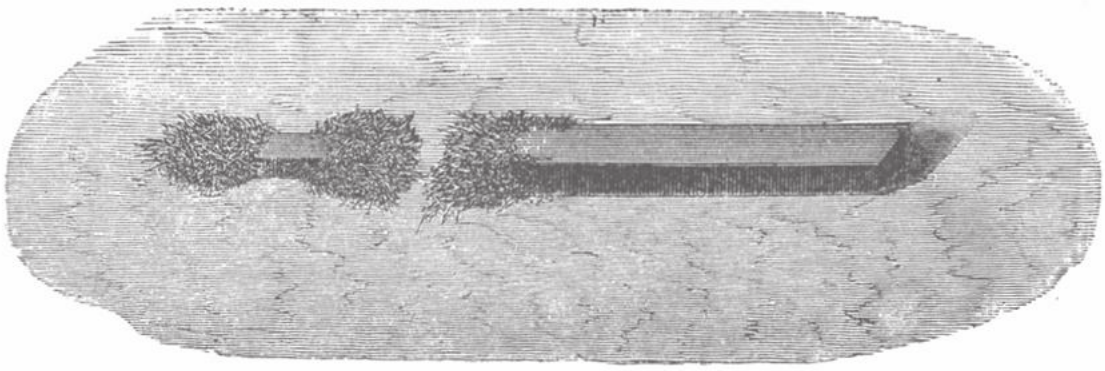


Fig. 56.

ter Art, während der Pol am entfernten Ende des Stabes denselben Magnetismus hat wie der induzierende Pol. Von den Körpern, bei welchen eine magnetisierende Kraft einen hohen Grad des Magnetismus erzeugt, sagt man, sie besitzen eine grosse *Permeabilität.* Es wird sogleich gezeigt werden, dass die magnetische Induktion längs gewisser Richtungen stattfindet, die man *Linien magnetischer Induktion* oder *magnetische Kraftlinien* nennt. Dieselben gehen sowohl durch Eisen und andere magnetische Media, als auch durch Luft, den luftleeren Raum, Glas oder andere nicht magnetische Media; und da die Induktion in Körpern von hoher magnetischer Permeabilität sehr leicht vor sich geht, so sagt man bisweilen, obgleich nicht ganz richtig, jene Kraftlinien gingen vorzugsweise durch magnetischen Stoff, oder, magnetischer Stoff sei ein Leiter der Kraftlinien.

97. Anziehung durch Körper hindurch. Wenn man eine Glasscheibe, ein hölzernes Brett oder ein Blatt Papier zwischen einen Magnet und das von ihm anzuziehende Stück Eisen oder Stahl hält, so zieht er dasselbe noch ebenso an, als ob nichts dazwischen wäre. Ein in einer versiegelten Glasröhre befindlicher Magnet wirkt noch als solcher. Lucretius fand, dass ein in einem Messinggefässe befindlicher Magnet auf Eisenfeilspähne noch durch das Messing hindurch anziehend wirkte. Gilbert umgab einen Magnet auf allen Seiten mit Flammen,

und fand, dass derselbe der magnetischen Anziehung von aussen her noch unterworfen war. Durch Wasser, den luftleeren Raum, und alle bekannten Körper wirken die magnetischen Kräfte, mit der alleinigen Ausnahme jedoch, dass die magnetische Kraft nicht durch *Eisen* oder andere magnetische Körper von einiger Dicke hindurch wirkt. Wenn man einen kleinen Magnet im Innern einer eisernen Hohlkugel aufhängt, so wirkt kein aussen befindlicher Magnet auf ihn ein und zwar

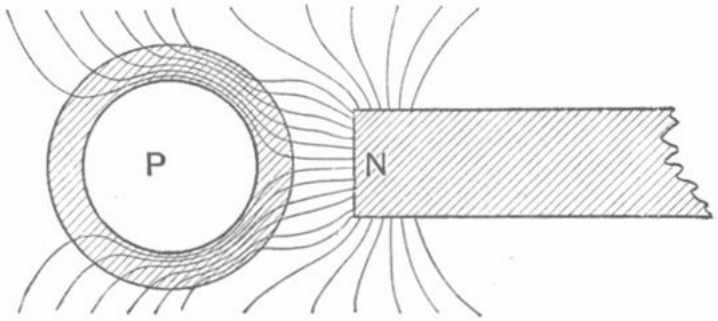


Fig. 57.

aus dem Grunde, weil die magnetischen Kraftlinien eine seitliche Ablenkung durch das Eisen erleiden, und also nicht in dasselbe eindringen. Ein hohles eisernes Gehäuse wirkt daher als *magnetischer »Käfig«*, und schützt seinen Innenraum vor magnetischen Einwirkungen. Fig. 57 zeigt, auf welche Weise ein Cylinder aus weichem Eisen den von ihm eingeschlossenen Raum vor der Influenz eines äussern Magnets schützt. Eine im Innern des Cylinders in P aufgestellte Magnetnadel wird durch die Nähe des äussern Magnets nicht beeinflusst, denn die magnetischen Kraftlinien desselben werden seitlich abgelenkt. In derselben Weise kann ein im Innern des Cylinders befindlicher Magnet den äussern Raum nicht beeinflussen.

Obgleich die magnetische Induktion auch aus der Entfernung durch eine dazwischen befindliche Schicht von Luft, Glas oder luftleeren Raum hindurch wirkt, so kommt doch ohne Zweifel das dazwischen befindliche Medium bei der Uebertragung der magnetischen Kraft direkt in Betracht, obschon das wahre Medium wahrscheinlich der die Moleküle der Materie umgebende Aether ist, und nicht die Moleküle selbst.

Wir können uns jetzt klar machen, weshalb ein Magnet ein vorher nicht magnetisches Stück Eisen anzieht; derselbe magnetisiert es zunächst durch Induktion und zieht es dann an; denn in dem nächstgelegenen Ende wird die entgegengesetzte Art des Magnetismus induziert, und dasselbe wird dann mit einer Kraft angezogen, welche diejenige, womit das entfernte Ende abgestossen wird, übertrifft. Aber *die Induktion geht der Anziehung voraus.*

98. Remanenter Magnetismus. Nicht alle magnetischen Substanzen können permanent zu Magneten werden. Magnetstein, Stahl und Nickel behalten den grössern Teil des ihnen mitgeteilten Magnetismus permanent. Gusseisen und manche unreinen Sorten des Schmiedeeisens behalten ebenfalls den Magnetismus in unvollkommener Weise. Je weicher und reiner ein Stück Eisen ist, desto leichter behält es seinen Magnetismus. Folgender Versuch macht dies klar. Man nehme ein paar kleine Eisenstäbe oder einige Nägel aus weichem Eisen. Wird einer von ihnen an den einen Pol eines permanenten Stahlmagnets gehängt (Fig. 58), so wird derselbe angezogen und wird selbst ein temporärer Magnet. An ihn kann man einen zweiten Eisenstab hängen, an diesen einen dritten u. s. w., bis man eine Kette von 4 bis 5 Eisenstäben aufgebaut hat. Wenn man jedoch den Stahlmagnet von dem obersten Stabe der Kette wegnimmt, so fallen alle übrigen ab, und es ergiebt sich, dass sie nun nicht mehr Magnete sind. Es lässt sich eine ähnliche Kette aus Stahlnadeln bilden; diese jedoch behalten ihren Magnetismus permanent. — Man findet jedoch, dass eine Stahlnadel schwieriger zu magnetisieren ist, als eine Eisennadel von derselben Grösse. Es ist schwieriger, den Magnetismus dem Stahl mitzuteilen, als dem Eisen, und ebenso ist es schwieriger, den Magnetismus dem Stahl zu entziehen, als dem Eisen; denn Stahl behält den einmal ihm mitgeteilten Magnetismus. Dieser Widerstand gegen das Magnetisieren oder Entmagnetisieren wird bisweilen *Koercitiv-*

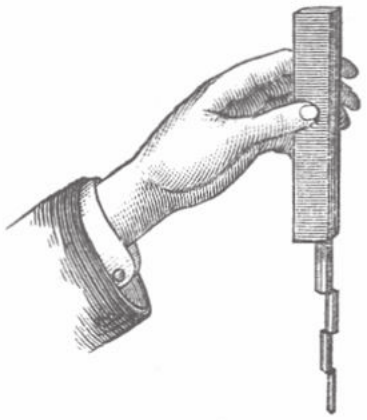


Fig. 58.

Kraft genannt; ein bei weitem besserer Ausdruck, welcher von Lamont herrührt, ist **Retentionskraft.** Die Retentionskraft des hart angelassenen Stahls ist gross; die des weichen Schmiedeeisens sehr klein. Je härter der Stahl, desto grösser seine Retentionskraft. Auch die Gestalt kommt hierbei in Frage. Längliche Formen und solche, welche einem geschlossenen oder fast geschlossenen Kreise gleichkommen, behalten ihren Magnetismus besser, als kurze Stäbe, Kugeln oder Würfel.

99. Theorieen des Magnetismus. Der Leser wird jedenfalls die auffallenden Analogieen zwischen den Erscheinungen der Anziehung, Abstossung, Induktion etc. des Magnetismus und denen der Elektrizität bemerkt haben. Und doch haben beide Reihen von Naturerscheinungen nichts mit einander zu thun. Ein + elektrischer Körper zieht weder den nach Norden, noch den nach Süden zeigenden Pol des Magnets als solchen an; freilich zieht derselbe jeden Pol an, gleichviel welchen Magnetismus er hat, aber eben nur so wie irgend einen andern Körper. Zwischen Magneten und statischen elektrischen *Ladungen* kennt man keine Beziehung. Dagegen existiert eine direkte Beziehung zwischen Magneten und elektrischen *Strömen*, wie wir weiter unten auseinandersetzen werden.

In vielen Lehrbüchern ist es Usus, von einem, resp. zwei *magnetischen Fluidis* zu sprechen; es ist aber *absolut sicher, dass der Magnetismus kein Fluidum ist,* was er sonst auch sein möge. Der Ausdruck ist ein Ueberbleibsel vergangener Zeiten. Wenn man mit einem Magnet ein Stück Stahl streicht, so wird letzteres magnetisch, *ohne dass der Magnet auch nur das geringste von seinem Magnetismus verloren hat.* Ein Fluidum kann sich ohne Verlust unmöglich bis ins Unendliche ausbreiten. Die Gründe, welche man aus dem Verhalten eines Magnets beim Zerbrechen herleitet oder aus andern, in der zehnten Vorlesung beschriebenen Versuchen, sind noch triftiger. Deshalb wollen wir nicht eher eine Theorie des Magnetismus vortragen, bis der Leser mit diesen Thatsachen bekannt gemacht worden ist.

IX. VORLESUNG: *Methoden zur Anfertigung von Magneten.*

100. Magnetisierung durch einfachen Strich. Wir haben bisher angenommen, dass Stahlstäbe oder Nadeln dadurch zu magnetisieren seien, dass man sie mit dem einen Pole eines permanenten Magnets von Eisenerz oder Stahl einfach berührt oder sie damit der Länge nach streicht. In diesem Falle wird die zuletzt berührte Stelle des Stabes ein Pol, welcher dem zum Streichen benutzten entgegengesetzt ist. Eine sicherere Wirkung erzielt man, wenn man das eine Ende der Stahlnadel mit dem einen Pole des Magnets, und das andere Ende mit dem andern Pole streicht. Es giebt jedoch noch bessere Methoden, einen Stab oder eine Nadel zu magnetisieren.

101. Magnetisierung durch Doppelstrich mit getrennten Magneten. Bei dieser Methode wird der zu magnetisierende Stab horizontal gelegt und zwei Stabmagnete werden alsdann so auf denselben gesetzt, dass ihre entgegengesetzten Pole neben einander sind. Dieselben werden dann von der Mitte des Stabes nach seinen beiden Enden geführt und wieder zurück, mehrere Male. Der Stab wird dann umgewendet und die Operation wiederholt, wobei man zu beachten hat, die Magnete in der Mitte des Stabes abzuheben. (Man sehe Fig. 59). Die

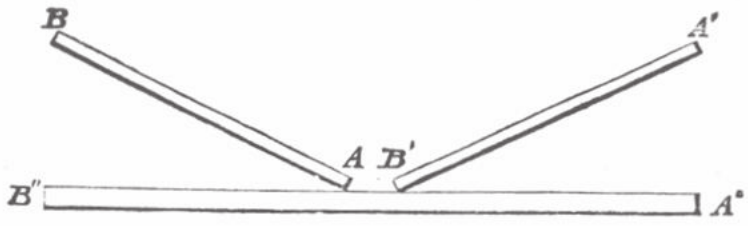


Fig. 59.

Wirkung ist kräftiger, wenn man während des Streichens den Stab mit seinen Enden auf die Pole zweier andern Stabmagnete legt, so dass die Pole dieselben sind wie die der beiden Magnete, welche über ihnen zum Streichen des Stahlstabes benutzt werden.

102. Magnetisierung durch Doppelstrich mit vereinten Magneten. Eine andere Methode weicht etwas von der

zuletzt beschriebenen ab. Ein Stück Holz oder Kork wird zwischen die Enden der beiden zu benutzenden Stabmagnete gelegt, welche dann beide zusammen vorwärts und rückwärts längs des zu magnetisierenden Stabes geführt werden. Bei keiner dieser Methoden kann jedoch ein Stahlstab über einen gewissen Grad der Intensität magnetisiert werden.

103. Formen der Magnete. Natürliche Magnete sind gewöhnlich von unregelmässiger Gestalt, obgleich sie bisweilen durch Beschneiden oder Schleifen eine regelmässige Gestalt bekommen. Früher war es gebräuchlich, sie mit Seitenteilen aus weichem Eisen oder Armaturen zu versehen, die als Pole dienten.

Zu wissenschaftlichen Versuchen verwendet man gewöhnlich *Stabmagnete* aus gehärtetem Stahl; zu manchen Zwecken zieht man jedoch die *Hufeisenform* vor. Beim Hufeisenmagnet sind die Polenden so umgebogen, dass sie nahe bei einander liegen; der Vorteil in diesem Falle besteht darin, dass jetzt beide Pole ein und dasselbe Eisenstück anziehen können. Die Armatur oder der Anker, wie man das quer vor die Pole gelegte Stück weichen Eisens nennt, wird durch Induktion selbst zum Magnet, wenn es an die Pole gelegt wird; daher ist die Kraft, mit welcher es vom Magnet angezogen wird, um so grösser, da *beide* Pole es magnetisieren.

Fig. 60. Fig. 61.

104. Lamellen-Magnete. Man hat gefunden, dass lange dünne Stahlmagnete im Verhältnis zu ihrem Gewichte kräftiger sind, als dickere. Deshalb schlug Scoresby[1]) vor, zusammengesetzte Magnete zu konstruieren, bestehend aus dünnen Stahlplatten, welche erst einzeln magnetisiert und dann in Bündeln zusammengebunden wurden. (Fig. 60.) Diese Lamellenmagnete sind kräftiger als einfache Stahlstäbe. Häufig benutzt man zu-

1) Einen ähnlichen Vorschag machte Geuns von Venlo im Jahr 1768. Kürzlich hat Jamin ähnliche Magnete konstruiert.

sammengesetzte Hufeisenmagnete. Die einzeln magnetisierten Platten werden, wie Fig. 61 zeigt, zusammengesetzt.

105. Magnetisierung durch die Erde. Wenn man nicht über einen Stabmagnet verfügt, so kann man den Magnetismus der Erde verwerten, um einen Stahlstab zu magnetisieren. Gilbert fand, dass Eisenstäbe, welche lange Zeit aufrecht gestanden hatten, von der Erde Magnetismus erhielten. Wenn man ein stählernes Schüreisen so in den magnetischen Meridian hält, dass das Nordende nach unten gerichtet ist, und dann dasselbe in dieser Lage mit einem hölzernen Hammer schlägt, so findet man, dass dasselbe magnetische Eigenschaften angenommen hat. In den nördlichen Breitegraden haben alle vertikalen eisernen Säulen an ihrem untern Ende einen Nordpol, an ihrem obern einen Südpol. In Australien und auf der südlichen Hemisphäre ist das obere Ende der eisernen Säulen ein Nordpol. Stahldrähte, welche man, solange sich dieselben im magnetischen Meridiane befinden, einer Torsion unterwirft, werden hierdurch ebenfalls magnetisch.

106. Magnetisierung nach dem Erhitzen. Gilbert machte auch die Entdeckung, dass ein Stahlstab magnetische Polarität annahm, wenn derselbe bis zur Rotglühhitze erwärmt und dann, während er sich im magnetischen Meridian befand, langsam oder plötzlich abgekühlt wurde. Wird der Stab von Osten nach Westen gerichtet und dann abgekühlt, so nimmt derselbe keine derartige Eigenschaft an. Man hat den Vorschlag gemacht, kräftige Magnete auf die Weise anzufertigen, dass man heisse Stahlstäbe zwischen den Polen sehr kräftiger Elektromagnete erkalten lässt; und Carré hat kürzlich starke Magnete hergestellt, indem er Stahl in Formen gegossen hat, welche sich innerhalb eines intensiven magnetischen Feldes befanden.

107. Magnetisierung durch elektrische Ströme. Wird ein starker elektrischer Strom durch einen spiralförmig um einen Eisen- oder Stahlstab gewundenen Draht geführt, so wird der Stab kräftiger magnetisiert als in allen vorhergehenden Fällen. Hat man einen Stab aus weichem Eisen, so wird derselbe ein

Magnet, aber nur so lange wie der Strom durch die Spirale fliesst. Eine solche Anordnung wird ein **Elektromagnet** genannt; derselbe wird in der 31. Vorlesung ausführlich beschrieben. Fig. 62 veranschaulicht eine gebräuchliche Form eines Elektromagnets, welcher aus 2 Rollen isolierten Kupferdrahts besteht, der auf 2 die Schenkel eines weichen Eisenkerns umschliessende Spulen gewickelt ist. Die Armatur besteht ebenfalls aus weichem Eisen von hinreichender Dicke. Stahlstäbe lassen sich dadurch magnetisieren, dass man sie über die Pole eines solchen Elektromagnets zieht, während derselbe durch den elektrischen Strom erregt wird. Elias von Haarlem machte den Vorschlag, Stahlstäbe dadurch zu magnetisieren, dass man sie durch einen in vielen Windungen zu einem Reifen aufgewickelten Draht steckte, durch welchen man alsdann einen starken Strom einer Volta'schen Batterie schickte.

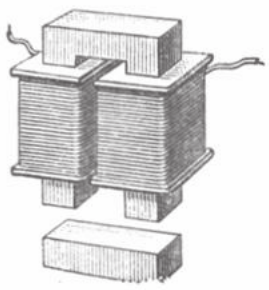


Fig. 62.

108. Härten und Tempern des Stahls für magnetische Zwecke. Es giebt zwei Methoden, um Stahl zu härten: 1) Plötzliches Abkühlen aus klarer Rotglühhitze. 2) Zusammenpressen auf hydraulischem Wege, während der Stahl sich langsam abkühlt. Wird ein Stahlstab bis zur Rotglühhitze erwärmt und dann in Wasser, Oel oder Quecksilber abgekühlt, so wird derselbe spröde wie Glas. Um gehärteten Stahl hierauf zu tempern, wird derselbe dann wieder bis zu einer schwachen Rotglühhitze erwärmt, wobei er weich wird und eine Strohfarbe annimmt. Durch weiteres Erwärmen nimmt er eine blaue Farbe an und wird elastisch und biegsam. Kurze Stabmagnete behalten den grössten Teil ihres Magnetismus, wenn man sie spröde lässt, ohne sie zu tempern. Dagegen behalten solche Magnete, welche circa 20 mal so lang als dick sind, ihren Magnetismus um so besser, wenn sie bis zur Stroh- oder gar bis zur blauen Farbe getempert werden.

109. Vernichtung des Magnetismus. Ein Stahlmagnet verliert seinen Magnetismus zum Teil oder vollständig, wenn

derselbe unvorsichtig gehandhabt oder absichtlich geschlagen oder gehämmert wird. Frisch angefertigte Magnete verlieren eher ihren Magnetismus durch unvorsichtige Handhabung als diejenigen, welche schon vor längerer Zeit gemacht worden sind. Ein Magnet verliert seinen Magnetismus auch, wie Gilbert zeigte, wenn er bis zur Rotglühhitze erwärmt wird. Durch die geringste Vibration wird jeder Magnetismus vernichtet, der in ausgeglühtem weichem Eisen zurückgeblieben ist.

110. Magnete von unabänderlicher Stärke. Gewöhnliche Stahlmagnete haben durchaus keinen permanenten oder konstanten Magnetismus. Sie verlieren bald einen beträchtlichen Prozentsatz ihres Magnetismus, und diese Abnahme dauert Monate und Jahre lang. Jeder Stoss, dem man sie aussetzt, jede Berührung mit Eisen, jeder Temperaturwechsel schwächt sie. Jedes Mal, wo der Anker an einen Hufeisenmagnet angelegt wird, wird letzterer geschwächt. Nun sind behufs magnetischer Messungen sowie als Kontrollmagnete in Galvanometern solche Magnete erforderlich, welche die grösstmögliche Unveränderlichkeit ihrer Stärke aufweisen. Bei ihrer Anfertigung hat man folgende Punkte zu berücksichtigen. Man wähle eine Form, welche fast einem geschlossenen Kreise gleichkommt, oder einen sehr langen Stab. Der Stahl muss so viel wie möglich gehärtet (vergl. Art. 108) und hierauf 20 bis 30 Stunden lang in Dampf von 100° gebracht werden. Hierauf magnetisiere man den Stahl möglichst vollkommen, und erhitze ihn dann wieder circa 5 Stunden lang in Dampf. Magnete, die in Gestalt einem fast geschlossenem Kreise gleichkommen, sind konstanter als kurze gerade Magnete.

111. Wirkungen der Wärme auf das Magnetisieren. Wenn ein permanenter Stahlmagnet erhitzt wird, indem man ihn in heisses oder kochendes Wasser legt, so nimmt seine Stärke dadurch ab, zum Teil gewinnt er dieselbe indessen beim Erkalten wieder. Kühlt man einen Magnet ab, so nimmt seine Stärke zu. Gusseisen wird bei klarer Rotglühhitze oder bei einer Temperatur von ungefähr 700° C. von einem Magnet nicht mehr angezogen. Kobalt behält seinen Magnetismus bei den höch-

sten Temperaturen. Chrom hört auf magnetisch zu sein bei ungefähr 500° C. und Nickel bei 350° C. Mangan zeigt magnetische Anziehung erst dann, wenn es bis auf — 20° C. abgekühlt ist. Man hat deshalb vermutet, dass andere Metalle ebenfalls magnetisch würden, falls man sie auf eine genügend niedrige Temperatur brächte. Trowbridge fand, dass ein energisches Abkühlen bis auf 100° unter Null den Magnetismus der Stahlmagnete zerstört; dagegen hat Dewar beobachtet, dass die magnetische Kraft des Eisens, falls dasselbe in flüssigem Sauerstoff bis auf ungefähr — 200° C. abgekühlt wird, fast doppelt so gross ist wie bei 0°. Bei hohen Temperaturen werden die magnetischen Metalle nicht diamagnetisch, sondern sind noch schwach magnetisch.

112. Magnetische Sättigung. Ein Magnet, dem der stärkste Grad von Magnetismus, den er überhaupt annehmen kann, gegeben ist, heisst *gesättigt*. Ein eben magnetisierter Magnet scheint bisweilen *übersättigt* zu sein, indem er selbst dann, wenn die Einwirkung der magnetisierenden Kraft schon aufgehört hat, einen höhern Grad von Magnetismus besitzt, als derselbe dauernd bewahren kann. Ein hufeisenförmiger Stahlmagnet trägt z. B. unmittelbar nach seiner Magnetisierung ein grösseres Gewicht, als dann, wenn seine Armatur schon einmal von seinen Polen abgenommen ist. Sogar weiches Eisen behält, nachdem es magnetisiert wurde, einen kleinen Teil seines Magnetismus, nachdem sein *temporärer Magnetismus* schon verschwunden ist. Diese kleine zurückbleibende magnetische Ladung nennt man *magnetisches Residuum*.

113. Stärke eines Magnets. Die *Stärke* eines Magnets ist nicht dasselbe wie seine Tragkraft. Letztere ist eine ganz unbestimmte Grösse, welche nicht allein von der Gestalt der Polflächen, sondern auch von der Gestalt und Beschaffenheit des als Last benutzten Eisenstücks abhängt. Folglich muss die Stärke eines Magnetpols durch die magnetische Kraft, welche er auf andere in der Nähe befindliche Magnete ausübt, gemessen werden. Angenommen z. B. wir hätten 2 Magnete A

und B, deren Stärke wir vergleichen, indem wir jeden auf den N-Pol eines dritten Magnets C wirken lassen. Wenn der N-Pol von A den Magnet C zweimal so stark abstösst, wie der in dieselbe Entfernung gebrachte N-Pol von B, so sagen wir, dass die Stärke von A noch einmal so gross ist, wie die von B. Man kann die Sache auch noch in etwas anderer Weise auffassen und sagen, die Stärke eines Poles ist gleich der Menge von freiem Magnetismus an jenem Pole. Wenn wir die in Art. 141 definierte Krafteinheit magnetischer Pole adoptieren, so können wir die Stärke eines Poles numerisch durch die Anzahl von Krafteinheiten ausdrücken.

114. Tragkraft. Die Tragkraft eines Magnets hängt sowohl von seiner Form als auch von seiner magnetischen Stärke ab. Ein hufeisenförmiger Magnet hebt eine 3 bis 4 mal grössere Last, als ein Stabmagnet von derselben Schwere. Ein langer Stabmagnet trägt mehr als ein kurzer Stabmagnet von gleicher Stärke. Ein Stabmagnet mit abgerundetem Ende trägt mehr als derselbe Stab mit plattem Ende, auch dann, wenn beide gleich stark magnetisiert worden sind. Auch wächst die Tragkraft eines Magnets in höchst merkwürdiger und unerklärlicher Weise, wenn man nach und nach die Last an seiner Armatur vergrössert, bis er eine Last trägt, die er im Anfange nicht hätte tragen können. Wird die Last jedoch derart vergrössert, dass die Armatur abgerissen wird, so sinkt die Kraft des Magnets plötzlich wieder auf ihre ursprüngliche Höhe herab. Die Anziehung zwischen einem kräftigen Elektromagnet und seiner Armatur kann auf 14 Kilogramm pro Quadrat-Zentimeter steigen. Kleine Magnete tragen eine im Verhältnis zu ihrem eigenen Gewichte grössere Last als grosse Magnete [1]), weil die Trag-

---

1) Bernouilli gab folgende Regel, um die Tragkraft p eines Magnets vom Gewichte w zu finden:

$$p = a \sqrt[\frac{3}{2}]{w};$$

wo a eine Konstante bedeutet, die von der Güte des Stahls und der Methode, ihn zu magnetisieren, abhängt. Bei den besten Stahlmagneten, die V. Wetteren in Haarlem verfertigte, schwankte dieser Koeffizient zwischen 19,5 und 23.

kraft unter sonst gleichen Verhältnissen der Polfläche proportional ist. Stahlmagnete erreichen selten eine grössere Anziehungskraft als 40 Pfund für jeden Quadratzoll Polfläche. Ein guter hufeisenförmiger Stahlmagnet von einem Pfund Gewicht sollte eine Last von 25 Pfund tragen. Isaac Newton soll einen kleinen, in einen Siegelring gefassten natürlichen Magnet besessen haben, der ein Stück Eisen trug, das 200 mal schwerer war, als der Magnet selbst.

X. VORLESUNG: *Verteilung des Magnetismus.*

115. Magnetisches Feld. Der einen Magnet umgebende Raum, über welchen sich die magnetischen Kräfte erstrecken, heisst das *magnetische Feld* jenes Magnets. Dasselbe ist in der Nähe des Magnetpols am stärksten, und wird um so schwächer, je grösser die Abstände von demselben werden. In jedem Punkte eines magnetischen Feldes hat die Kraft eine bestimmte Intensität, und wirkt in einer bestimmten Richtung. Man kann durch jeden Punkt eines magnetischen Feldes eine Linie ziehen, welche die Richtung der *resultierenden magnetischen Kraft* angiebt, die in diesem Punkte wirkt. Das ganze Feld kann auf diese Weise mit magnetischen Linien ausgefüllt werden (Art. 119). Beim Hufeisenmagnet ist das Feld am stärksten zwischen den beiden Polen, und die Linien der magnetischen Kraft sind Kurven, welche durch das Feld von dem einen Pole zum andern führen. Eine praktische Methode, die Verteilung der Kraftlinien in einem Felde zu untersuchen, findet sich in Art. 119 unter der Ueberschrift: Magnetische Figuren. Legt man die Armatur auf die Pole eines Hufeisenmagnets, so wird die Kraft des Magnets auf alle äussern Punkte geschwächt, denn die Induktion geht jetzt nicht durch den umgebenden Raum, sondern durch das Eisen der Armatur. In der That hat ein *geschlossenes System* von Magneten — z. B. ein aus 4 Stabmagneten gebildetes Quadrat, bei welchem der Nordpol des einen den Südpol des nächsten berührt — kein äusseres Kraftfeld. Ein *Stahlring* kann derart

magnetisiert werden, dass er weder Pole noch ein äusseres Feld hat; oder vielmehr kann jeder Punkt des Ringes als ein N-Pol und S-Pol zu gleicher Zeit angesehen werden, die so nahe bei einander liegen, dass ihre Kräfte sich gegenseitig aufheben.

Dass entgegengesetzte Pole sich neutralisieren, lässt sich durch das bekannte Experiment nachweisen, wo man einen kleinen Körper, z. B. einen Stahlring oder Schlüssel, an den N-Pol eines Stabmagnets hängt. Wenn man dann diesen mit dem S-Pole eines zweiten Stabmagnets berührt, so neutralisieren die beiden Pole ihre Kräfte, und der Ring oder Schlüssel fällt ab.

116. Zerbrechen eines Magnets. Wir haben bereits gesehen, dass, wenn ein Magnet in 2 oder mehrere Teile zerbrochen wird, jeder Teil wieder ein vollständiger Magnet mit Polen ist, und dass jeder nahezu ebenso stark magnetisiert ist, wie der ursprüngliche Magnet. (Siehe Fig. 63). Wenn die ab-

Fig. 63.

gebrochenen Teile wieder eng zusammengefügt werden, so neutralisieren sich die an einander anstossenden Pole und verschwinden, so dass nur noch die Pole an den Enden übrig bleiben, wie früher. Wenn ein Magnet zu Pulver gemahlen wird, so wirkt

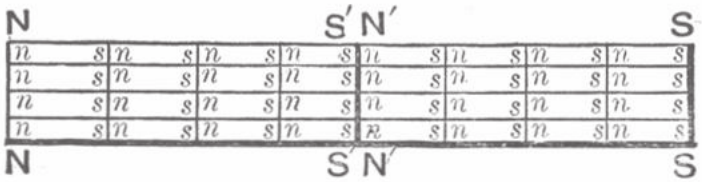


Fig. 64.

jedes Teilchen noch als ein kleiner Magnet und zeigt Polarität. Man kann daher einen Magnet als aus vielen kleinen Magneten bestehend ansehen, welche so zusammengesetzt sind, dass ihre gleichnamigen Pole alle nach derselben Seite zeigen. Eine solche Zusammensetzung zeigt Fig. 64, aus welcher hervorgeht, dass,

wenn der Magnet an irgend einer Stelle zerbrochen wird, die eine Seite der Bruchfläche nur N-Pole, die andere nur S-Pole zeigt. Dies ist richtig, gleichviel wie klein die einzelnen Teilchen sind. —

117. Normale Verteilung. Bei einem gewöhnlichen Stabmagnet finden sich die Pole nicht ganz an den Enden des Stabes, sondern etwas davon entfernt; und es lässt sich darthun, dass dies eine Folge der Art und Weise ist, wie der Magnetismus in dem Stabe verteilt ist. Ein sehr langer, dünner, gleichförmig magnetisierter Stab hat seine Pole an den Enden; aber in gewöhnlichen, dicken Magneten nimmt der »Pol« ein beträchtliches Gebiet ein, der freie Magnetismus nimmt von den Enden des Stabes nach der Mitte zu allmählich ab. Immer aber kann man einen Punkt bestimmen, in welchem die Resultante der magnetischen Kräfte angreift, und den man in den meisten Fällen als Pol betrachten darf. In gewissen Fällen der unregelmässigen Magnetisierung ist es möglich, dass zwischen den Endpolen noch einer oder mehrere andere Pole liegen. Solche Pole heissen *Folge-Pole* (vgl. Art. 120).

118. Lamellen-Verteilung des Magnetismus; magnetische Schalen. Bis jetzt haben wir nur die gewöhnliche Verteilung des Magnetismus in einem Stabe betrachtet. Aber es ist möglich, den Magnetismus auf einer dünnen Platte derart zu verteilen, dass die ganze Vorderfläche derselben nur die eine Art Magnetismus und die ganze Hinterfläche nur die andre Art Magnetismus hat. Eine derartige Verteilung ist allerdings unbeständig. Wenn eine sehr grosse Zahl kleiner Magnete neben einander gestellt würden, etwa wie die Zellen in einer Honigscheibe, alle nordsuchenden Pole nach oben und alle südsuchenden Pole nach unten gerichtet, so würde die ganze eine Seite der Platte ein grosser ebener nordsuchender Pol sein und die andre Seite ein südsuchender Pol. Eine derartige Verteilung über eine Fläche oder Scheibe heisst eine **Lamellen**-Verteilung, zum Unterschiede von der gewöhnlichen Verteilung längs einer Linie oder eines Stabes, welche die **Solenoid**-Verteilung genannt

wird. Ein lamellar magnetisierter Magnet wird bisweilen eine **magnetische Schale** genannt.

119. Magnetische Figuren. Gilbert zeigte [1]), dass, wenn ein Blatt Papier oder eine Karte über einen Magnet gehalten wird und Eisenfeilspähne über das Papier gestreut werden, sich dieselben in krummen Linien festsetzen, welche eine *magnetische Figur* bilden, deren allgemeine Form in Bezug auf einen Stabmagnet in Fig. 65 abgebildet ist. Die Spähne müssen fein sein

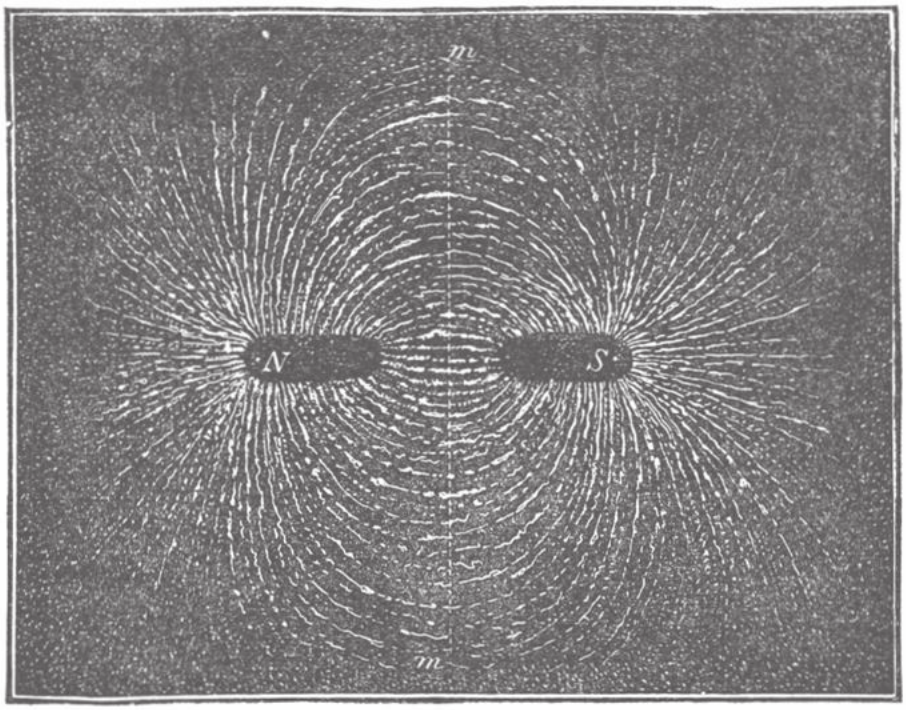


Fig. 65.

und durch Musselin gesiebt werden; und um ihr Festsetzen in den Linien zu erleichtern, mus man das Blatt Papier einmal leise anstossen. Die so erhaltenen Figuren können auf verschiedene Weise dauernd fixiert werden. Am besten thut man, wenn man statt des Blattes Papier eine Glasplatte nimmt und dieselbe vorher gummiert und trocken werden lässt. Nachdem man sie über den Magnet gelegt hat, siebt man die Spähne gleichförmig auf die Oberfläche und führt einen leisen Stoss gegen das Glas. Dann lässt man einen Dampfstrahl vorsichtig über die Platte streichen, welcher die Oberfläche des Gummis

1) Die magnetischen Figuren waren dem Lucretius bekannt.

erweicht, und dieser befestigt beim Erhärten die Spähne an ihren Plätzen. Die Ansicht der Figur zeigt, dass die Linien fast strahlenförmig von jedem Pole auslaufen und sich im Bogen denen des andern Pols nähern. Fig. 66 zeigt, dass das magnetische Feld eines Hufeisenmagnets zwischen den Polen die grösste Intensität besitzt, und über dieselben hinaus sich in weitverzweigten Kurven erstreckt. Faraday, der diese Methode vielfach dazu verwandte, um die Verteilung des Magnetismus in verschiedenen Feldern zu untersuchen, gab den Linien den Namen **Kraftlinien.** Wie aus der Einwirkung auf kleine magnetische Teilchen hervorgeht, welche sich, den Anziehungen und Abstossungen im Felde folgend, in den Figuren anordnen, stellen diese Linien die Richtung der resultierenden Kraft in jedem Punkte dar; denn jedes Teilchen strebt die Richtung derjenigen magnetischen Kraft anzunehmen, welche aus der gleichzeitigen Wirkung beider Pole hervorgeht; daher kann man sagen, jene Linien veranschaulichen die unsichtbaren magnetischen Kraftlinien [1]). Faraday wies nach, dass die Kraftlinien ein Bild des magnetischen Feldes geben, indem sie durch ihre Lage die Richtung der magnetischen Kraft und durch ihre Zahl die Intensität derselben angeben. Wenn man sich einen kleinen nordsuchenden Pol allein verschaffen und ihn auf irgend eine dieser Kraftlinien legen könnte, so würde er bestrebt sein, sich längs jener Linie von Norden nach Süden zu bewegen; ein einzelner südsuchender Pol würde längs jener Linie sich in entgegengesetzter Richtung zu bewegen streben. In Fig. 67, welche das Feld in der Nähe des einen Pols eines Stabmagnets darstellt, verlaufen die magnetischen Linien einfach radial. Faraday zeigte auch, dass die anziehenden oder abstossenden Kräfte des Feldes stets zu den Richtungen in dem Felde der magnetischen Linien in Beziehung stehen. Er schrieb diesen Kraftlinien auch gewisse

---

1) Oder vielmehr die nach der Ebene der Figur genommene Komponente der magnetischen Kraft; was nicht ganz dasselbe ist, denn oberhalb der Pole stehen die Spähne fast senkrecht zu dieser Ebene.

physikalische Eigenschaften zu (welche jedoch nur in übertragener Bedeutung richtig sind), nämlich, dass sie sich zwischen ihren Enden zu verkürzen bestrebt sind, und dass sie einander abstossen, wenn sie neben einander liegen. Die neuere Anschauungsweise besagt, dass in jedem magnetischen Felde gewisse Kräfte thätig sind, welche längs der Kraftlinien eine Spannung, und senkrecht gegen dieselben einen Druck ausüben.

120. Folgepole. Die vorstehend beschriebene Methode kann man dazu benutzen, um sich von dem Vorhandensein *von Folgepolen* in einem Stahlstabe zu überzeugen, da die in diesem Falle erhaltene Figur der in Fig. 68 gleichen muss. Solcher Zustand kommt zum Vorschein, wenn ein Stück sehr harten Stahls absichtlich unregelmässig magnetisiert wird, indem man es an gewissen Stellen mit starken Magneten berührt. Ein auf diese Weise magnetisierter Stahl besteht in Rücksicht auf seine Kraftäusserungen aus mehreren Magneten, die mit ihren Enden zusammengelegt sind, aber in umgekehrter Richtung, N-S, S-N etc. Folgepole lassen sich auch in einem Elektromagnet hervorbringen, dadurch dass man den Draht um einen Teil des Eisenkerns in entgegengesetzter Richtung wickelt.

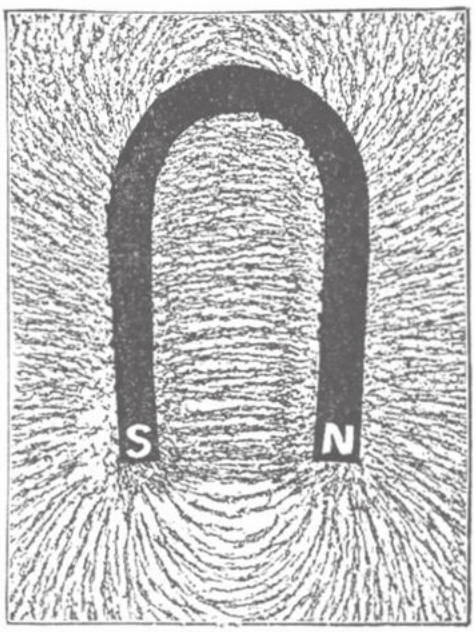


Fig. 66.

121. Die Kräfte, welche zwischen ungleichen Polen Anziehung und zwischen gleichen Polen Abstossung hervorbringen, werden durch die magnetischen Figuren, welche sich in den Feldern zwischen den Polen in beiden Fällen ergeben, prächtig

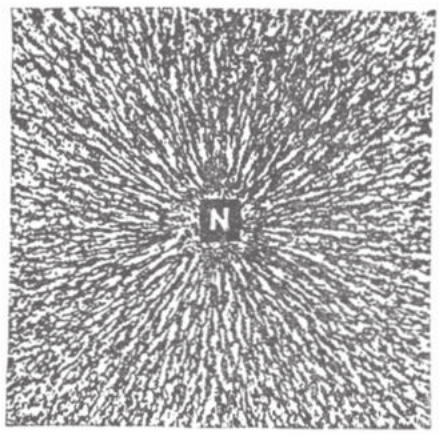


Fig. 67.

zur Anschauung gebracht. (Fig. 69 und 70.) In Fig. 69 sind die Pole entgegengesetzt und die Kraftlinien gehen im Bogen

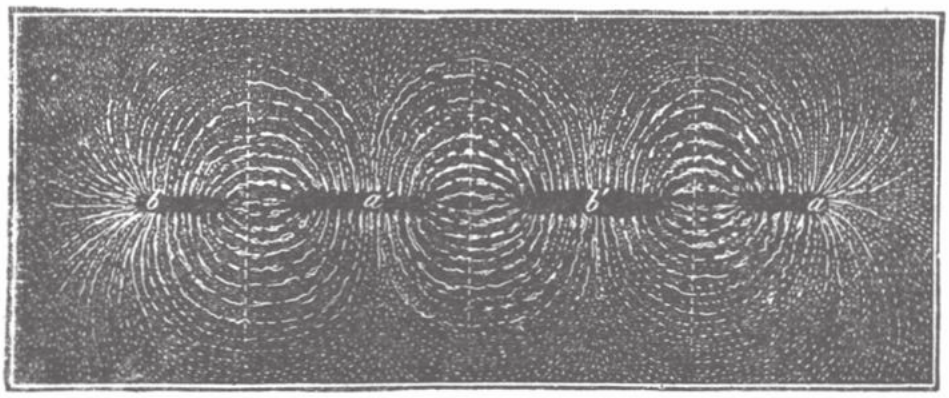


Fig. 68.

von einem Pole zum andern; während in Fig. 70, welche die Wirkung zweier gleichen Pole darstellt, die Kraftlinien sich so

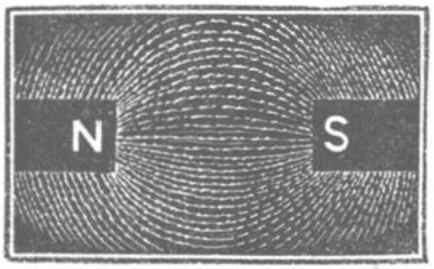


Fig. 69.

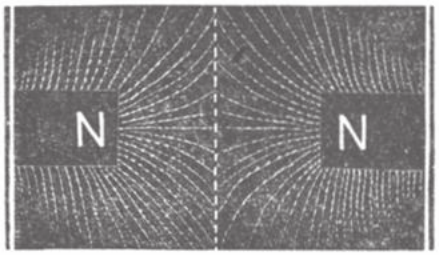


Fig. 70.

krümmen, als ob sie sich gegenseitig abstiessen, und sich rechtwinklig zur Seite wenden.

122. Magnetische Schrift. Eine andere Art der magnetischen Figuren entdeckte De Haldat, welcher mit dem Pole eines Magnets auf einer dünnen Stahlplatte (z. B. auf einem Sägeblatte) schrieb und dann Eisenfeilspähne darüber streute. Die Schrift, welche an sich völlig unsichtbar ist, offenbart sich in den Linien von Eisenfeilspähnen, welche an den magnetisierten Stellen haften. Diese magnetische Schrift bleibt in einer Stahlplatte mehrere Monate lang bestehen.

123. Magnetisierung der Oberfläche. In vielen Fällen ist der den Magneten mitgeteilte Magnetismus hauptsächlich auf die äusseren Schichten des Stahls beschränkt. Wenn ein Stahlmagnet in eine Säure gelegt wird, so dass die äusseren Schichten aufgelöst werden, so ergiebt sich, dass derselbe seinen Magne-

tismus schon verloren hat, wenn nur eine dünne Schicht auf diese Weise entfernt worden ist. Eine hohle magnetisierte Stahlröhre ist fast ein ebenso starker Magnet, wie ein solider Stab von derselben Grösse. Lange, dünne Magnete, sowie solche, welche der Gestalt nach fast einen geschlossenen Kreis bilden, lassen sich sehr viel vollständiger magnetisieren. Wenn ein Bündel Stahlplatten magnetisiert wird, während dieselben zusammengebunden sind, so stellt sich heraus, dass nur die äusseren Platten stark magnetisiert sind. Die inneren zeigen sogar bisweilen eine entgegengesetzte Magnetisierung.

124. Mechanische Wirkungen des Magnetisierens. Joule fand, dass ein eiserner Stab, der kräftig magnetisiert wurde, um $\frac{1}{720000}$ seiner Länge zunahm. Bidwell fand, dass Eisen sich bei noch stärkerem Magnetisieren wieder zusammenzieht; und dass Stäbe, welche durch ein Gewicht gespannt werden, sich beim Magnetisieren stärker zusammenziehen, als Stäbe, welche kein Gewicht tragen. Barrett beobachtete, dass Nickel beim Magnetisieren sich etwas zusammenzieht. Dies beweist, dass der Akt des Magnetisierens auf die Anordnung der Moleküle von Einfluss ist. Dieser Satz wird bestätigt durch die Beobachtung von Page, dass man in dem Augenblicke, wo ein Stab magnetisiert oder entmagnetisiert wird, ein schwaches metallisches Klingen in dem Stabe hört. W. Grove zeigte an einem Quantum Wasser, welches er in eine Röhre gegossen und dann getrübt hatte, indem er fein gestossenes magnetisches Eisenoxyd darin aufrührte, dass die Flüssigkeit sich beim Magnetisieren der Röhre in der Richtung des Magnetisierens aufklärte, indem die Teilchen sich offenbar ihrer Länge nach, Ende an Ende an einander lagerten und mehr Licht zwischen sich hindurch liessen. Ein tordierter Eisendraht strebt, wenn er magnetisiert wird, in seine Ruhelage zurückzukehren, sich zu detordieren. Wird ein Stück Eisen in rascher Aufeinanderfolge kräftig magnetisiert und entmagnetisiert, so wird dasselbe warm, als ob das Magnetisieren von innerer Reibung begleitet wäre.

125. Wirkung des Magnetismus auf das Licht.

Faraday entdeckte, dass ein polarisierter Lichtstrahl bei seinem Durchgange durch gewisse Körper in einem kräftigen magnetischen Felde die Richtung seiner Schwingungen ändert. Diese Erscheinung, welche bisweilen die Magnetisierung des Lichtes genannt wird, wird besser als die Drehung der optischen Polarisationsebene durch Magnetismus bezeichnet. Die Grösse der Drehung ist je nach den Medien verschieden, und ändert sich mit der magnetisierenden Kraft. Kürzlich hat Kerr gezeigt, dass durch Reflexion am Ende oder an der Seite eines kräftigen Magnets die Polarisationsebene des polarisierten Lichtes ebenfalls gedreht wird. Weitere Erwähnung finden diese Entdeckungen in dem Kapitel über Elektrooptik, Vorlesung 56.

126. Der Akt des Magnetisierens. Alle diese verschiedenen Erscheinungen deuten auf eine Theorie des Magnetismus, welche sehr von der alten Vorstellung der Fluida abweicht. Es scheint, dass jedes Molekül eines Magnets selbst wieder ein Magnet ist, und dass der Magnet nur dadurch als ein Ganzes zu einem Magnet wird, dass die Moleküle sich so drehen, dass sie alle nach derselben Richtung zeigen. Der Akt des Magnetisierens besteht darin, den Molekülen mehr oder weniger eine besondere Richtung zu erteilen. Diese Schlussfolge wird durch die Beobachtung unterstützt, dass, wenn man eine mit Eisenfeilspähnen gefüllte Glasröhre magnetisiert, man sehen kann, wie sich die Eisenfeilspähne mit ihren Längsaxen einander parallel und parallel der Längsaxe der Glasröhre stellen, und dass sie, nachdem sie sich einmal so gestellt haben, wie ein Magnet wirken, bis sie wieder geschüttelt werden. Es scheint schwieriger zu sein, die einzelnen Moleküle von festem Stahl in dieser Weise zu richten, als diejenigen des weichen Eisens; aber, nachdem sie so gerichtet sind, bleiben sie auch stehen, wenn sie nicht kräftig geschlagen oder erhitzt werden. Aus dieser Theorie geht hervor, dass die Grenze der möglichen Magnetisierung erreicht wäre, wenn alle Moleküle sich mit ihren Längsaxen parallel gestellt hätten. Einige sorgfältige Versuche von Beetz mit durch Elektrolyse ausgeschiedenem Eisen bestätigen diesen Schluss

vollkommen, und verleihen der Theorie mehr Ansehen. Fig. 71 giebt eine Vorstellung von einem unmagnetischen Stück Eisen oder Stahl, in welchem die Anordnung der Moleküle durchaus verschieden ist; wir bemerken hier keine irgendwie vorherrschende Richtung. Wird das Eisen etwas magnetisiert, so findet

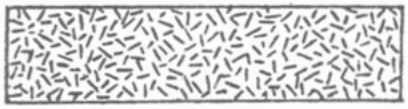


Fig 71.

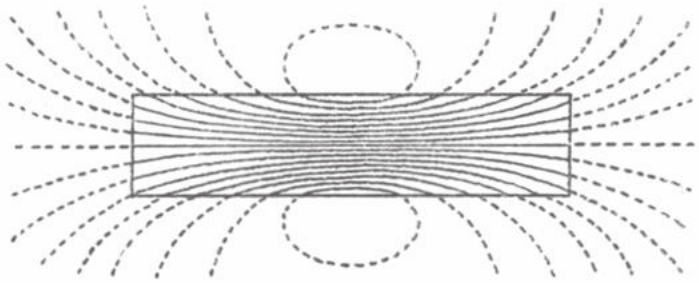


Fig. 72.

sich ein grösserer Prozentsatz von Molekülen, welche die Richtung der magnetisierenden Kraft annehmen. Wäre das Eisen absolut magnetisch, so würden alle Moleküle nach einer und derselben Richtung zeigen, wie in Fig. 72.

In sehr wenigen Fällen ist jedoch die Magnetisierung gleichförmig längs des ganzen Stabes: in der Mitte desselben sind mehr Moleküle gleichgerichtet als an den Enden. Wäre die innere Magnetisierung des Stahls an jeder Stelle gleich stark, so fänden sich die freien Pole nur an den Endflächen; aber die Thatsache, dass der freie Magnetismus sich nicht bloss an den Enden findet, sondern von den Enden nach der Mitte abnimmt, beweist, dass die Intensität der innern Magnetisierung nach den Enden zu geringer sein muss, als in der Mitte des Stabes. Fig. 72 soll dies veranschaulichen. Man beachte, dass die magnetischen Linien durch das Eisen hindurchgehen und bei ihrem Uebergang in die Luft sich krümmen. Einige Linien gehen nicht durch den ganzen Stab, sondern zeigen eine seitliche Abweichung. Wäre der Stab gleichförmig magnetisiert, so würden die Linien bloss an den Enden austreten. Offenbar ist das mittlere Stück vollständiger magnetisiert als irgend ein anderer Teil. Der Magnetismus ist in der That eine Art Struktur, welche auf das Eisen übertragen wird. Jedes Mal, wo diese Struktur an der Oberfläche auftritt, zeigen sich die Oberflächeneigenschaften

des Magnetismus. Ein Pol ist nichts weiter als ein Gebiet, wo die magnetischen Linien aus der Oberfläche des Eisens austreten.

Die optischen Erscheinungen führten Maxwell zu dem weiteren Schlusse, dass diese longitudinal-geordneten Moleküle um ihre Längsachen rotieren, und dass im Aether des Raumes ebenfalls eine drehende Bewegung längs der Linien der magnetischen Induktion stattfindet; da diese Bewegung, wenn sie in einem vollkommenen Medium vor sich geht (und als solches kann der Aether betrachtet werden) Spannungen längs der Linien des magnetischen Feldes und Drucke rechtwinklig gegen sie erzeugt, so würde dieselbe eine zufriedenstellende Erklärung der magnetischen Anziehungen und Abstossungen an die Hand geben, welche offenbar durch den leeren Raum hindurch wirken. Hughes, Barus und andere haben kürzlich gezeigt, dass der Magnetismus des Eisens und des Stahls mit der molekularen Festigkeit des Materials in engem Zusammenhange steht. Hughes's Untersuchungen mit der Induktions-Wage (Art. 509) und der magnetischen Wage (Art. 140) wollen nachweisen, dass jedes Molekül eines magnetischen Metalls eine absolut konstante besondere magnetische Polarität hat; und dass, wenn ein Stück Eisen oder Stahl scheinbar neutral ist, seine Moleküle innerlich so geordnet sind, dass sie ihre Polarität gegenseitig aufheben, indem sie geschlossene magnetische Ströme unter sich bilden.

127. Ewings Theorie des Molekularmagnetismus. Weber nahm an, dass die Moleküle des magnetisierten Stahls infolge einer Art Reibung nicht wieder in ihre frühere willkür-

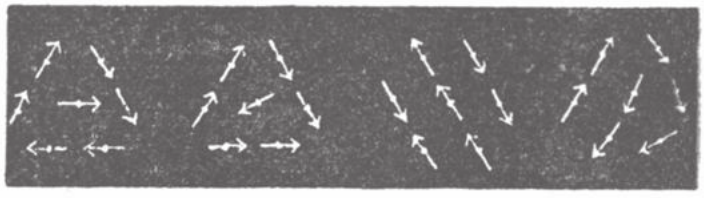


Fig. 73.

liche Lage zurückkehren könnten. Dagegen erklärte Ewing diese Thatsache durch die Annahme, dass die Moleküle gegenseitig auf einander einwirken. Bei einer Gruppe von Molekülen,

welche nicht unter dem Einflusse einer äussern magnetisierenden Kraft stehen, werden sich dieselben so anordnen, dass sie ihrer eigenen Polarität genügen. Unter den möglichen Gruppen sind jedoch einige labil. Fig. 73 zeigt 4 mögliche stabile Gruppen von je 6 drehbaren Nadeln. Ewing konstruierte einen Apparat, welcher aus einer grossen Anzahl von drehbaren Magnetnadeln bestand, die sich alle in derselben Ebene befanden. Wurden diese Nadeln in Schwingungen versetzt und dann sich selbst überlassen, so kamen sie in verschiedenen Gruppierungen zur Ruhe; wurden sie jedoch durch eine allmählich zunehmende magnetische Kraft beeinflusst, so gerieten sie in Umdrehung und man konnte dabei drei Stationen beobachten; 1) Bei Anwendung einer kleinen magnetischen Kraft drehten sich die Nadeln bloss um einen kleinen Winkel. 2) Wurde eine stärkere Kraft angewandt, so wurden die Gruppen labil, und einige der Nadeln schwangen plötzlich in eine neue Lage, so dass die Mehrzahl derselben fast (aber nicht vollständig) in die Richtung der Kraft zu stehen kamen. 3) Eine weitere Verstärkung der magnetischen Kraft konnte nicht erheblich mehr bewirken; die Nadeln kamen nur noch etwas vollkommener in die Richtung der Kraft. Alles dieses entspricht den drei Stationen, welche man beim allmählichen Magnetisieren des Eisens oder Stahls beobachten kann (s. Art. 359).

XI. VORLESUNG: *Gesetze der magnetischen Kraft.*

128. Gesetze der magnetischen Kraft.

Erstes Gesetz: *Gleichnamige Magnetpole stossen sich ab, ungleichnamige Magnetpole ziehen sich an.*

Zweites Gesetz: *Die Kraft, welche zwei Magnetpole auf einander ausüben, ist dem Produkte ihrer Intensitäten direkt und dem Quadrate ihrer Entfernung umgekehrt proportional*, vorausgesetzt, dass diese Entfernung so gross ist, dass die Pole als blosse Punkte angesehen werden können.

129. Das Gesetz vom umgekehrten quadratischen

Verhältnis. Das zweite der obigen Gesetze ist allgemein als das Gesetz vom umgekehrten quadratischen Verhältnis bekannt. Dasselbe gilt genau genommen nur für Punkte, und nicht für Pole von grösserer Oberfläche. Das analoge Gesetz der elektrischen Anziehung wurde bereits erläutert in Art. 19. Dies Gesetz erklärt eine in einer früheren Vorlesung, Art. 91, erwähnte Thatsache, dass kleine Eisenstücke wirklich von einem Magnetpole angezogen werden. Wenn man ein kleines Stück Eisendraht *a b* (Fig. 74) an einem Faden aufhängt und ihm den nordsuchenden Pol eines Magnets nähert, so wird das Eisen durch Induktion magnetisiert; dasselbe dreht sich und zeigt nach dem Magnetpole, indem es sich so nahe als möglich längs einer Kraftlinie stellt und sein nahes Ende *b* ein südsuchender, sein entferntes Ende *a* ein nordsuchender Pol wird. Nun wird der Pol *b* angezogen und der Pol *a* abgestossen. Aber diese beiden Kräfte sind einander nicht gleich, da die Entfernungen ungleich sind. Die Abstossung ist nach dem Gesetze vom umgekehrten quadratischen Verhältnis proportional $\left(\frac{1}{A\,a}\right)^2$ und die Anziehung proportional $\left(\frac{1}{A\,b}\right)^2$; deshalb steht das Eisenstück *a b* unter dem Einflusse eines Kräftepaars, welches demselben eine bestimmte Richtung giebt, und auch unter dem Einflusse einer Resultierenden, welche es nach A zieht. Nur solche Körper werden von Magneten angezogen, in denen der Magnetismus auf solche Weise induziert werden kann; und sie werden nur wegen des in ihnen induzierten Magnetismus angezogen.

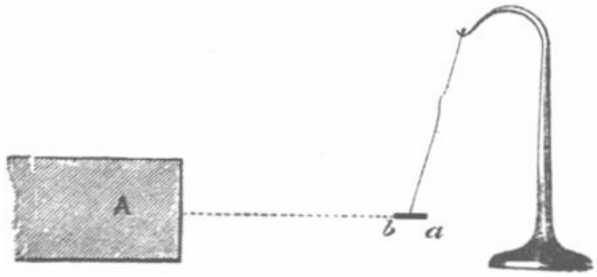


Fig. 74.

Wir erwähnten Art. 91, dass auf eine Magnetnadel, welche auf einem Stück Kork frei auf der Oberfläche einer Flüssigkeit schwimmt, Kräfte wirken, welche ihr eine bestimmte Richtung geben, dass jedoch dieselbe nicht wie im vorigen Falle, sich als Ganzes nach Norden oder Süden zu bewegen strebt. Die

Nadel erleidet eine Drehung, weil die Anziehung und Abstossung der Magnetpole der Erde in einer gewissen Richtung wirken; da aber die Magnetpole der Erde sich in einem ungeheuer grossen Abstande befinden im Vergleich zur Länge der schwimmenden Magnetnadel, so dürfen wir sagen, dass für alle praktischen Zwecke die Pole der Magnetnadel vom Nordpol der Erde gleich weit entfernt sind. Die anziehende Kraft, welche auf den nordsuchenden Pol der Nadel wirkt, ist deshalb für alle Fälle der Praxis nicht grösser, als die abstossende Kraft, welche auf den südsuchenden Pol ausgeübt wird. Daher erleidet die schwimmende Nadel als Ganzes keine forschreitende Bewegung: sie wird gerichtet, aber nicht angezogen.

130. Messung der magnetischen Kräfte. Die Richtigkeit des Gesetzes vom umgekehrten quadratischen Verhältnis lässt experimentell nachweisen, vorausgesetzt, dass wir ein Mittel haben, die Grösse der magnetischen Kräfte der Anziehung und Abstossung genau zu messen. Die magnetische Kraft kann nach einer der 4 folgenden Methoden gemessen werden: 1) indem man die Schwingungszeit einer Magnetnadel beobachtet, welche unter dem Einflusse der Kraft Schwingungen macht; 2) indem man die Ablenkung beobachtet, welche sie auf eine Magnetnadel hervorbringt, die bereits durch eine Kraft von bekannter Intensität abgelenkt ist; 3) indem man derselben durch die Torsion eines elastischen Fadens das Gleichgewicht hält; 4) indem man ihr durch die Schwerkraft das Gleichgewicht hält, welche hier in der Weise benutzt wird, dass man versucht, einen an 2 parallelen Fäden aufgehängten Magnet (oder einen *bifilar* aufgehängten Magnet) abzulenken, denn diese Fäden können nur dadurch aus ihrer parallelen Lage entfernt werden, dass der Schwerpunkt des Magnets höher zu liegen kommt.

131. Der Ablenkungsversuch. Fig. 75 zeigt einen Apparat, bei welchem eine Kompassnadel durch den einen Pol eines Magnets abgelenkt werden kann. Letzterer besteht aus einem langen, dünnen Stahlstabe, welcher so aufgestellt ist, dass sein oberer Pol sich stets über dem Mittelpunkte der Nadel be-

findet und daher derselben keine Drehung erteilt. In dieser Lage wirkt derselbe wie ein Magnet mit nur einem Pole, und dieser kann in verschiedene Abstände von der Nadel gebracht werden. Bei Anwendung einer besondern Tangentenskala (s. Art. 211) ergiebt sich, dass bei Verdopplung des Abstandes sich die ablenkende Kraft auf $^1/_4$ reduziert u. s. w.

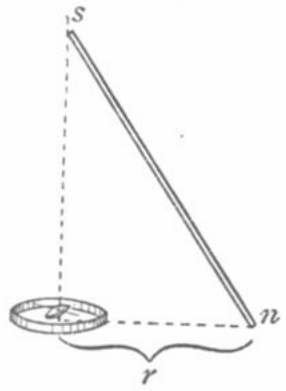


Fig. 75.

132. Die Torsionswage. Coulomb gebrauchte die Torsionswage zur Messung magnetischer Kräfte. Die wesentlichsten Bestandteile dieses Apparates (wie derselbe zur Messung der elektrischen Abstossung dient) wurden auf Seite 20 beschrieben. Fig. 76 zeigt, wie derselbe zur Messung der magnetischen Ab-

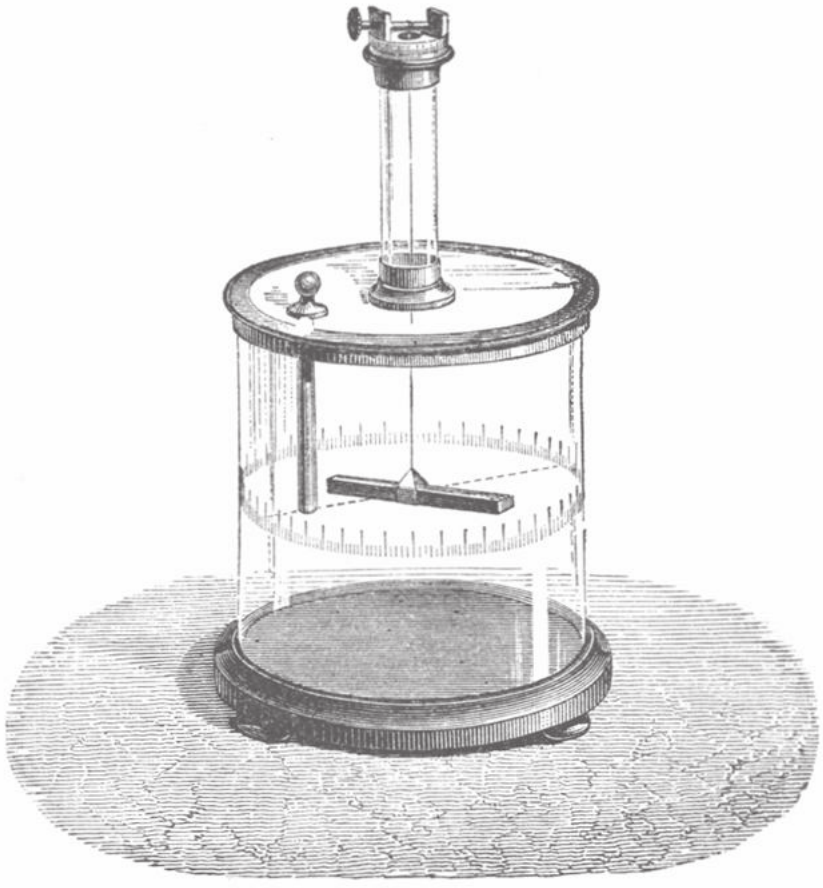


Fig. 76.

stossung eingerichtet ist. Um das Gesetz von den umgekehrten quadratischen Verhältnis zu beweisen, stellte Coulomb folgenden Versuch an: Der Apparat wurde zunächst so eingestellt, dass

eine in einer Kupferhülse an einem dünnen Silberdrahte aufgehängte Magnetnadel sich im magnetischen Meridian befand, ohne dass der Draht tordiert war. Dies bewerkstelligte er dadurch, dass er zuerst den Magnet in die Hülse legte und den Apparat annähernd einstellte, dann den Magnet durch einen gleich schweren Kupferstab ersetzte und den Apparat abermals einstellte, indem er auf diese Weise den Fehler durch wiederholte Versuche verringerte. Hierauf hatte er zu untersuchen, um wie viel Grad er die Torsionsscheibe am obern Ende des Fadens zu drehen hatte, damit die Nadel um 1 Grad aus dem magnetischen Meridian entfernt würde. Es stellte sich dabei heraus, dass auf 35^0 Drehung 1^0 Ablenkung des Magnets kam. Darauf brachte er einen zweiten Magnet derart in den Apparat, dass derjenige Pol desselben, welcher den Pol der aufgehängten Nadel abstiess, nach unten gerichtet war. Er fand, dass der Pol der Nadel um 24 Grad abgestossen wurde. Durch den vorhergehenden Versuch wissen wir, dass dieser abstossenden Kraft 24×35^0 der Torsionsscheibe entsprechen, und hierzu müssen wir noch die Tordierung des Drahtes, d. h. 24 , hinzufügen, so dass wir im Ganzen 864 haben, was wir das »Torsionsäquivalent« der abstossenden Kraft nennen wollen, für den Fall, wo die Pole um 24 von einander entfernt sind. Schliesslich wurde die Torsionsscheibe so gedreht, dass der aufgehängte Magnet dem festen Pole näher gebracht wurde, so lange, bis der Abstand zwischen den sich abstossenden Polen nur noch halb so gross wie anfänglich war. Es ergab sich, dass die Torsionsscheibe 8 volle Umdrehungen machen musste, damit die Pole einen Abstand von 12^0 hatten. Diese 8 Umdrehungen betragen $8 \times 360^0 = 2880^0$. Allein das untere Ende des Fadens war ausserdem noch im Vergleich zum obern Ende um 12^0 gedreht; die diese Drehung erzeugende Kraft entspricht daher einer Torsion von $12 \times 35^0 = 420^0$; hierzu muss noch die wirkliche Drehung von 12^0 hinzugefügt werden, so dass sich im Ganzen $2880^0 + 420^0 + 12^0 = 3312^0$ ergeben. Hieraus ergiebt sich, dass, wenn man den Abstand der Magnetpole um die Hälfte verkleinert, die Kraft *vier mal* so gross wird, denn 3312 ist fast

das vierfache von 864. Hätte man den Abstand der Pole auf den dritten Teil reduziert, so würde die Kraft 9 mal so gross gewesen sein. Setzen wir dies Gesetz als richtig voraus, so können wir die Torsionswage dazu gebrauchen, die Stärke von Magnetpolen zu messen, indem wir die Kräfte messen, welche sie in bekannten Abständen ausüben.

133. Methode der Schwingungen [1]). Wenn wir einen Magnet, welcher an einem Faden aufgehängt ist oder auf einer Spitze balanciert, aus seiner Ruhelage bringen, so schwingt derselbe hin und her, und zwar so, dass die Schwingungen in *fast genau gleichen* Zeiten ausgeführt werden, obgleich die Amplitude (Schwingungsbogen) derselben allmählich abnimmt. In der That folgen sie einem ähnlichen Gesetze, wie die Schwingungen eines Pendels, welches unter dem Einflusse der Schwerkraft schwingt. Das Gesetz der Pendelschwingungen heisst: *Das Quadrat der Zahl der in einer gewissen Zeit ausgeführten Schwingungen ist der Kraft proportional.* Folglich können wir magnetische Kräfte dadurch messen, dass wir die in einer Minute von einem Magnet gemachten Schwingungen zählen. Dabei darf man jedoch nicht vergessen, dass die wirkliche Anzahl der von einem gegebenen Magnet gemachten Schwingungen sowohl von dem Gewichte, der Länge und der Gestalt des Magnets, als auch von der Stärke des magnetischen Feldes, in welchem er sich befindet, abhängt (s. Art. 356).

Wir können diese Methode dazu benutzen, um die Intensitäten des Erdmagnetismus [2]) an zwei verschiedenen Orten mit einander zu vergleichen, indem man denselben Magnet an beiden Orten schwingen lässt. Wenn derselbe am ersten Orte *a* Schwingungen in der Minute macht, und am zweiten Orte *b* Schwingungen in

---

1) Man kann auch *elektrische* Kräfte durch eine »Methode der Schwingungen« messen; indem man eine kleine geladene Kugel, welche an dem einen Ende eines horizontal aufgehängten Stabes befestigt ist, unter der Einwirkung der anziehenden Kraft eines in ihrer Nähe befindlichen, geladenen Konduktors schwingen lässt, dessen »Kraft« in dieser Entfernung dem Quadrate der Schwingungen während einer gegebenen Zeit proportional ist.

2) oder genauer der *horizontalen Komponente* des Erdmagnetismus.

der Minute, so verhalten sich die magnetischen Kräfte beider Orte wie $a^2 : b^2$.

Ferner können wir die Methode dazu benutzen, um die Kraft, welche ein Magnet in der Nähe eines Ortes ausübt, mit der Kraft des Erdmagnetismus dieses Ortes zu vergleichen. Denn wenn wir eine kleine Magnetnadel irgendwo schwingen lassen, und wir finden, dass dieselbe unter der vereinten Einwirkung [1]) des Erdmagnetismus und des benachbarten Magnets m Schwingungen in der Minute macht, n Schwingungen dagegen nach Entfernung des Magnets unter dem alleinigen Einflusse des Erdmagnetismus, so ist m^2 den vereinten Kräften proportional, n^2 dagegen der vom Erdmagnetismus herrührenden Kraft, und die Differenz $m^2 - n^2$ ist der von dem benachbarten Magnet herrührenden Kraft proportional.

134. Oberflächenverteilung. Wir wollen jetzt die Methode der Schwingungen anwenden, um die relativen Mengen von Oberflächenmagnetismus in den verschiedenen Punkten eines Stabmagnets zu messen. Der zu prüfende Magnet wird aufrecht gestellt (Fig. 77). Ein kleiner Magnet, welcher horizontal schwingen kann, wird in seine Nähe gebracht und in geringem Abstande von seinem Ende aufgehängt und dann in Schwingung versetzt, wobei die Schwingungen während einer bestimmten Zeit gezählt werden. Nehmen wir an, dass die Nadel unter dem Einflusse des Erdmagnetismus allein 3 volle Schwingungen in der Minute ausführen würde, dagegen 14, wenn sie in der Nähe des Poles des vertikalen Magnets schwingt, so ist die Kraft des letztern der Differenz $14^2 - 3^2 = 187$ proportional. Hierauf wollen wir die schwingende Nadel in demselben Abstande einer etwas tiefer ge-

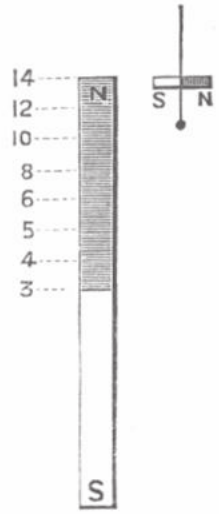


Fig. 77.

1) Wir nehmen in diesem Falle an, dass der Magnet so aufgestellt ist, dass seine Kraft mit der des Erdmagnetismus jenes Ortes gleiche Richtung hat, und dass der andere Pol des Magnets so weit entfernt ist, dass er auf die schwingende Nadel keinen Einfluss mehr ausübt.

legenen Stelle des Magnets gegenüber aufhängen. Schwingt sie hier 12mal in der Minute, so wissen wir, dass die Kraft der Differenz $12^2 - 3^2 = 135$ proportional ist. Auf diese Weise finden wir, dass mit abnehmender Kraft auch die Zahl der Schwingungen kleiner wird, und dass wenn wir die Nadel der Mitte des vertikalen Magnets gegenüber aufhängen, erstere nur noch 3 mal in der Minute schwingt, oder dass die erdmagnetische Kraft die einzige Kraft ist, welche auf die Schwingungen der Nadel von Einfluss ist. In Fig. 77 haben wir die Zahl der Schwingungen für die

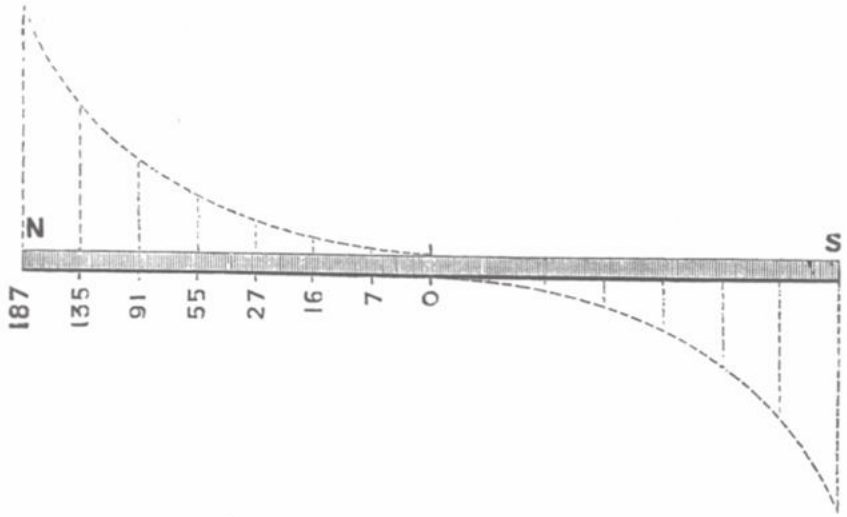


Fig. 78.

auf einander folgenden Stellen angegeben, nämlich 14, 12, 10, 8, 6, 5, 4 und 3. Wenn wir diese Zahlen quadrieren und jedesmal 9 abziehen, so erhalten wir für die Kräfte an den verschiedenen Stellen folgende Zahlen: 187, 135, 91, 55, 27, 16, 7 und 0. Von diesen Kräften können wir sagen, dass sie die Stärke des freien Magnetismus an den verschiedenen Stellen darstellen, und es ist zweckmässig, dieselben graphisch darzustellen, nach Art der Fig. 78, wo die Längen der punktierten Linien das Verhältnis der Kräfte darstellen sollen. Die Kurve, welche die Endpunkte dieser »Ordinaten« verbindet, zeigt graphisch, wie die Kraft, welche am Ende am grössten ist, nach der Mitte zu abnimmt. Auf einen entfernten Magnetpol würden diese durch das krummlinige Dreieck dargestellten Kräfte so wirken, als wenn sie in einem Punkte des Magnets vereinigt wären, welcher dem »Schwerpunkte« dieses Dreiecks gegenüber liegt; oder mit andern Worten

der »Pol«, welcher der Mittelpunkt der resultierenden Kräfte ist, liegt nicht am Ende des Magnets. In dünnen Stäben aus magnetisiertemStahl liegt er ungefähr um den zehnten Teil der Magnetlänge vom Ende entfernt.

135. Magnetisches Moment. Das Bestreben eines Magnets, einen zweiten Magnet abzulenken oder von ihm abgelenkt zu werden, hängt nicht allein von der Stärke m seiner Pole ab, sondern auch von der Poldistanz l. Das Produkt dieser beiden Grössen, $m\ l$, heisst das **magnetische Moment** des Magnets, und wird bisweilen mit M bezeichnet. Da die genaue Lage der Magnetpole oft unbekannt ist, so ist es leichter, die Grösse M zu bestimmen, als einzelne m oder l zu messen.

136. Methode der Ablenkungen. Es giebt mehrere Methoden, bei denen die Ablenkung eines Magnets durch einen zweiten Magnet benutzt werden kann, um magnetische Kräfte zu messen. Wir können hier nur eine Uebersicht der wichtigsten Grundsätze geben. Wenn zwei gleiche und entgegengesetzt gerichtete Kräfte auf die Enden eines unbiegsamen Stabes wirken, so streben sie denselben zu drehen. Solche 2 Kräfte nennt man ein »Kräftepaar«, und ihre Wirkung oder das »Moment« des Kräftepaares erhält man, wenn man eine der beiden Kräfte mit dem senkrechten Abstande der Richtungen der Kräfte multipliziert. Ein solches Kräftepaar strebt eine drehende, aber keine fortschreitende Bewegung zu erzeugen. Nun wirkt auf eine Magnetnadel, welche sich in einem magnetischen Felde in schräger Stellung zu den Kraftlinien befindet, ein »Kräftepaar«, welches bestrebt ist, sie in den magnetischen Meridian zu drehen, denn der nordsuchende und der südsuchende Pol werden nach Norden, resp. Süden durch 2 gleiche, aber entgegengesetzt gerichtete Kräfte getrieben. Die auf jeden Pol wirkende Kraft ist das Produkt aus der Polstärke und der Intensität des »Feldes«, d. h. der horizontalen Komponente der erdmagnetischen Kraft des Ortes. Wir wollen die Stärke des nordsuchenden Pols m nennen, und das Zeichen H gebrauchen, um die in horizontaler Richtung vom Erdmagnetismus ausgeübte Kraft darzustellen. (Der Wert von

H ist an verschiedenen Punkten der Erdoberfläche verschieden.) Die auf den Pol A ausgeübte Kraft (Fig. 79) ist dann m . H und die auf den Pol B ausgeübte ist ebenso gross und entgegengesetzt gerichtet. Wir nehmen NS als die Richtung des magnetischen Meridians, so dass die Kräfte dieser Richtung parallel wirken. Nun bildet die Nadel AB einen Winkel mit dem Meridian NS, und die magnetische Kraft wirkt auf A in der Richtung der Linie PA und auf B in der Richtung QB, wie durch die Pfeile angedeutet ist. PQ ist der senkrechte Abstand der beiden Kräfte; daher erhält man das »Moment« des Kräftepaares, indem man die Länge PQ mit der auf einen der Pole ausgeübten Kraft multipliziert. Bezeichnet man das Moment des Kräftepaares mit Y, so ergiebt sich:

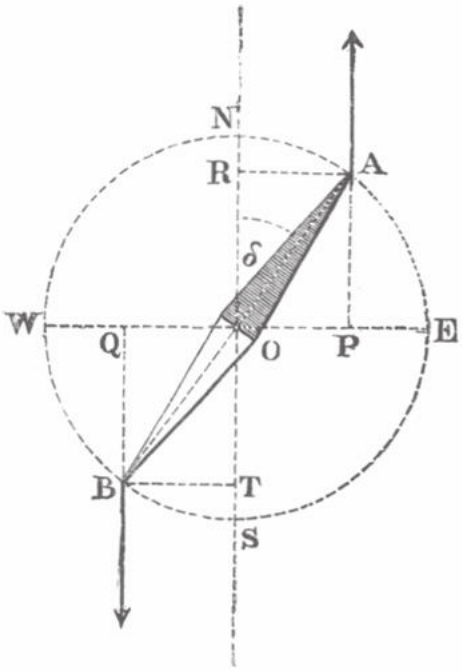


Fig. 79.

$$Y = PQ \times m \,.\, H.$$

PQ ist aber gleich der Länge des Magnets, multipliziert mit dem Sinus des Winkels AOR, dem Ablenkungswinkel, den wir δ nennen wollen. Bezeichnet man also den Abstand der beiden Pole mit l, so erhalten wir für das Moment des Kräftepaares:

$$Y = m\, l\, H \,.\, \sin \delta.$$

In Worten: Das »Moment des Kräftepaares«, welches auf die Nadel wirkt, ist ihrem »magnetischen Moment« $(m \times l)$, der horizontalen Kraft des Erdmagnetismus H, und dem Sinus des Ablenkungswinkels proportional. — Der Leser wird bemerkt haben, dass der Abstand PQ um so grösser ist, je weiter die Nadel von der Richtung NS sich entfernt, und dass derselbe am grössten ist, wenn die Nadel die Richtung EW, d. h. von Westen nach Osten angenommen hat. Ebenso ist das »Moment« des Kräftepaares, welches den Magnet zu drehen strebt, um so kleiner, je mehr die Nadel in die Richtung NS gelangt.

137. Gesetz der Tangenten. Wir wollen jetzt annehmen, dass die Ablenkung δ durch eine magnetische Kraft bewirkt wird, welche rechtwinklig zum magnetischen Meridian wirkt, und den Pol A in der Richtung RA zu bewegen strebt. Die Länge der Linie RT, multipliziert mit der neuen Kraft, ist dann das Moment des neuen Kräftepaares, welches den Magnet in die Richtung EW zu drehen strebt. Wenn dann die Nadel unter dem Einflusse dieser beiden Kräfte zur Ruhe gekommen ist, so ist klar, dass die beiden entgegengesetzten Drehungsmomente genau gleich sind, oder dass das Moment des einen Kräftepaares gleich dem Momente des andern Kräftepaares ist. Daher verhält sich die Kraft, welche in der Richtung WE wirkt, zu der Kraft, welche in der Richtung NS wirkt, wie PQ zu RT oder wie PO zu RO. Nennen wir diese Kraft f, so ist

$$f : \mathrm{H} = \mathrm{PO} : \mathrm{RO}$$

$$\text{oder} \qquad f = \mathrm{H} \cdot \frac{\mathrm{PO}}{\mathrm{RO}}$$

PO ist aber gleich AR, und $\frac{\mathrm{AR}}{\mathrm{RO}} = \operatorname{tang} \delta$, daher

$$f = \mathrm{H} \cdot \operatorname{tang} \delta$$

oder mit andern Worten: *die magnetische Kraft, welche rechtwinklig zum Meridian wirkt und einer Magnetnadel die Ablenkung δ erteilt, ist gleich der horizontalen Kraft des Erdmagnetismus an jenem Orte, multipliziert mit dem Tangens des Ablenkungswinkels.* Daraus folgt noch, dass zwei verschiedene magnetische Kräfte, welche rechtwinklig zum Meridian wirken, die Nadel einzeln um Winkel ablenken, *deren Tangenten den Kräften proportional sind.* Dieser höchst wichtige Satz wird bei der Konstruktion gewisser Galvanometer benutzt (vergl. Art. 207).

138. Magnetometer. Den Namen **Magnetometer** giebt man jedem Magneten, welcher speziell dazu eingerichtet ist, um magnetische Kräfte durch die Ablenkungen, welche sie hervorbringen, zu messen. Die Methoden, die *absoluten* Werte magnetischer Kräfte in *Kilogrammetern* oder andern abstrakten Krafteinheiten zu ermitteln, sollen in Art. 356 erklärt werden.

Sehr einfache Magnetometer, welche aus kleinen, auf einer Spitze balancierten oder an einem Faden aufgehängten Nadeln bestehen, wendet man gewöhnlich zur Messung der *relativen* Werte magnetischer Kräfte an. Eine sehr empfindliche Form (Fig. 80), welche, wie das Reflexionsgalvanometer (Art. 210) einen Lichtstrahl als Zeiger benutzt, besteht aus einem kleinen, dünnen mit Folie belegtem Glasspiegel von circa 1 cm Durchmesser, an dessen Rückseite 2 bis 3 sehr leichte Magnete befestigt sind und der in einem geeigneten Gehäuse mittelst eines einfachen Coconfadens aufgehängt ist. Eine andere brauchbare Form (Fig. 81) besteht aus einer kurzen Kompassnadel, welche auf einer Spitze balanciert und einen leichten Zeiger aus Aluminium trägt, der über einer nach Tangenswerten konstruierten Skala spielt (s. Art. 207).

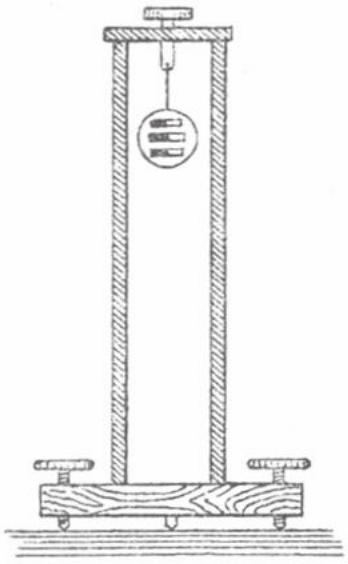


Fig. 80.

Ein geeignetes Ablenkungs-Magnetometer zur Vergleichung der magnetischen Momente zweier Magnete ist eine derartige Tangentenboussole, welche in die Mitte einer graduierten Scheibe gestellt wird. Man kann diesen Apparat in doppelter Weise gebrauchen:

1) Die Scheibe wird in die magnetische Ost-West Richtung gestellt und der ablenkende Magnet mit der *schmalen* Seite der Nadel zugekehrt (Fig. 82). In diesem Falle findet man, dass die Kraft dem magnetischen Moment direkt und dem Kubus des Abstandes der Mittelpunkte der Magnete umgekehrt proportional ist, d. h.

$$f = \frac{2M}{r^3}$$

Nun haben wir aber früher gesehen, dass $f = H. \tan \delta$ ist, wo H die horizontale Komponente des Erdmagnetismus bedeutet für einen Ort, dessen Ablenkung δ ist; folglich:

$$\frac{2M}{r^3} = H. \tan \delta, \text{ oder } M = \tfrac{1}{2}\, r^3\, H. \tan \delta$$

2) Die Scheibe wird in die Nord-Süd Richtung gestellt und der ablenkende Magnet mit der *breiten* Seite der Nadel zugekehrt. (Fig. 83.) Dann lenkt der Magnet die Nadel in entgegengesetzter Richtung ab und zwar mit der Hälfte der Kraft, die er bei gleichem Abstande in der vorigen Stellung ausgeübt haben würde. Die Kraft ist aber immer noch dem Kubus des Abstandes umgekehrt proportional, also:

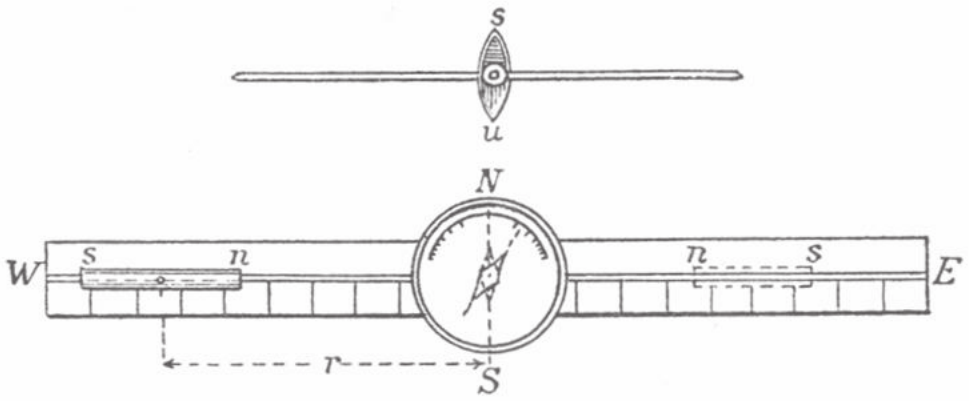


Fig. 81 und 82.

$$f = \frac{M}{r^3}, \text{ folglich } M = r^3 . H . \tan \delta.$$

139. Methode der Wägung. Bei jeder Stellung der Magnetometerscheibe kann man auf jede Seite der Nadel einen Magnet legen und so lange hin und her schieben, bis die Wirkungen der beiden Magnete einander das Gleichgewicht halten. Auf diese Weise lässt sich das Verhältniss ihrer magnetischen Momente durch das Verhältniss ihrer entsprechenden Abstände ausdrücken, nämlich:

$$M_1 : M_2 = r_1^3 : r_2^3.$$

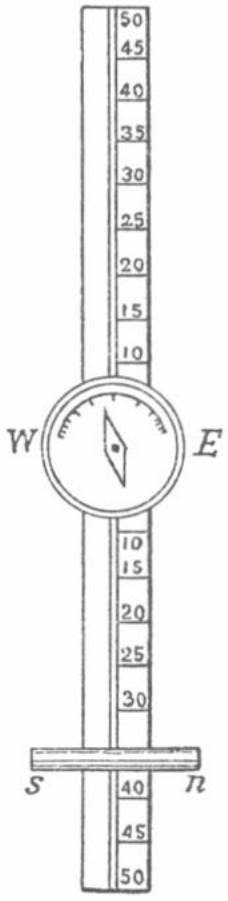


Fig. 83.

140. Magnetische Wage von Hughes. Ein sehr geeignetes Instrument, die magnetischen Eigenschaften verschiedener Eisen- oder Stahlproben zu prüfen, erfand Hughes im Jahre 1884. Die zu untersuchende Probe wird in eine magnetisierende Spule *A* (Fig. 84) geschoben und ein Strom um dieselbe geführt. Sie lenkt eine leicht beweglich auf-

gehängte Nadel B ab. Diese wird hierauf wieder in die Anfangslage gebracht, dadurch dass man einen grossen kompensierenden Magnet M um seinen Mittelpunkt dreht. Ausserdem

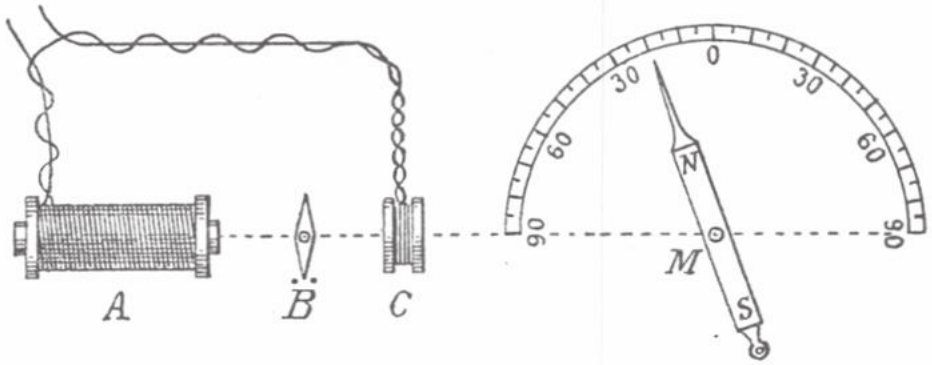


Fig. 84.

kommt noch eine kleine Spule C zur Anwendung, welche der direkt ablenkenden Wirkung der Spule A das Gleichgewicht hält. Der Verfasser dieser Vorlesungen hat nachgewiesen, dass, wenn der Abstand zwischen M und B 2, 3 mal so lang ist wie der Magnet M, der Winkel, um welchen M gedreht wird, proportional ist der magnetischen Kraft, welche dem Eisenkerne in A entspricht, vorausgesetzt, dass der Winkel kleiner als 60° ist.

141. Einheit der Polstärke. Das zweite magnetische Kraftgesetz (vergl. Art. 128) setzte fest, dass die zwischen 2 Polen ausgeübte Kraft dem Produkte ihrer Polstärken direkt und dem Quadrate ihres Abstandes umgekehrt proportional ist. Nun kann man die Einheit der Polstärke aber so wählen, dass diese Proportionalität eine numerische Gleichheit wird.

Zu dem Zwecke stellen wir die folgende Definition für Einheit der Polstärke oder magnetische Poleinheit auf: *Ein magnetischer Pol Eins ist ein solcher, welcher einen gleichartigen Pol von derselben Stärke im Abstande von 1 Zentimeter mit einer Kraft von einem Dyn abstösst* (vergl. Art. 347). Lassen wir diese Definition gelten, so können wir das zweite magnetische Kraftgesetz folgendermassen ausdrücken:

$$f = \frac{m \times m'}{d^2};$$

hierin bedeutet f die Kraft (in Dyn), m und m' die beiden Polstärken und d den Abstand der Pole (in Zentimetern). Aus

dieser Definition erklärt sich die willkürliche Festsetzung über magnetische Linien. Wenn wir uns irgendwo in einem magnetischen Felde einen Einheitspol aufgestellt denken, so wird auf demselben eine Kraft ausgeübt, und derselbe ist bestrebt sich längs der Linien des Feldes zu bewegen. Wenn sich dann ergiebt, dass an jener Stelle die auf den Pol ausgeübte Kraft H Krafteinheiten beträgt, so können wir schliessen, dass dort H Linien pro Quadratzentimeter vorhanden sind. Wenn wir z. B. sagen, das Feld hätte 50 Linien pro Quadratzentimeter, so bedeutet dies, dass auf einen dort befindlichen Einheitspol eine Kraft von 50 Einheiten ausgeübt wird. Diesen Gegenstand nimmt die 26. Vorlesung, Art. 333 wieder auf, wo die Theorie des magnetischen Potentials behandelt wird.

142. Theorie der magnetischen Kurven. Wir sahen im Art. 119, dass man magnetische Figuren durch Eisenfeilspähne erzeugen kann, welche sich innerhalb des Kraftfeldes eines Magnets in gewissen Linien festsetzen. Wir können jetzt mit Hilfe des Gesetzes vom umgekehrten quadratischen Verhältnis die Linien bestimmen, in welchen sich ein Eisenteilchen in irgend einem Punkte des Feldes festsetzt. Es sei NS (Fig. 85) ein langer,

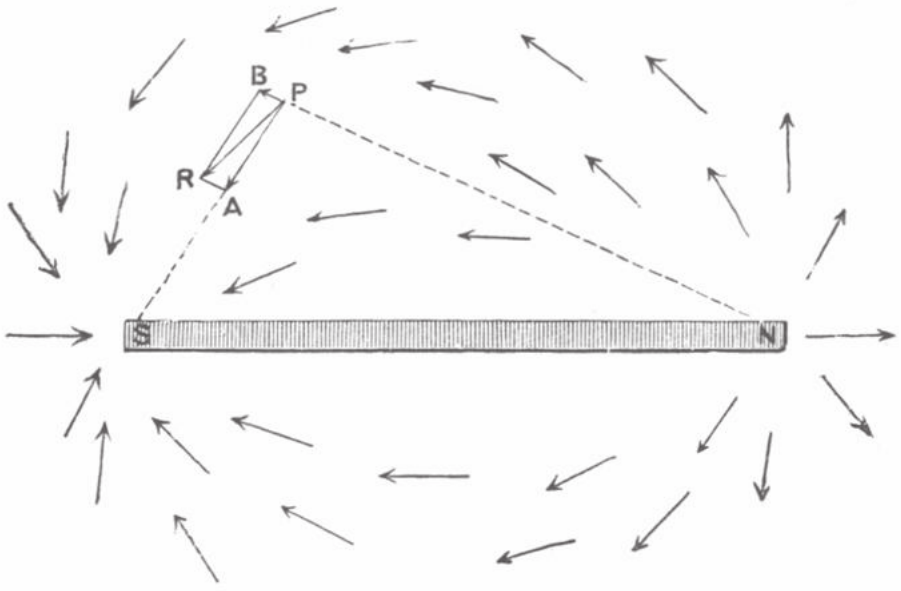


Fig. 85.

dünner Magnet, und P irgend ein Punkt in dem von seinem Magnetismus herrührenden Felde. Befindet sich der nordsuchende Pol eines kleinen Magnets in P, so wird derselbe von S ange-

zogen und von N abgestossen; die Richtungen dieser beiden Kräfte fallen mit den Linien PS und PN zusammen. Die Intensitäten der Kräfte können durch bestimmte auf diesen Linien abgetragene Längen dargestellt werden. Nimmt man an, dass der Abstand PN doppelt so gross ist, wie PS, so ist die abstossende Kraft in der Richtung PN gleich $\frac{1}{4}$ der anziehenden Kraft in der Richtung PS. Deshalb mache man die Kraft PA in der Richtung von P nach A viermal so lang, wie die Kraft PB in der Richtung von N nach P. Dann konstruiere man die Resultierende [1]), nach der bekannten Methode über Zusammensetzung mechanischer Kräfte, indem man die beiden Kräfte PA und PB zu dem Parallelogramm PARB vervollständigt; die Diagonale PR giebt alsdann nach Länge und Richtung die resultierende magnetische Kraft im Punkte P an. In der That stellt PR die Linie dar, längs welcher sich ein kleiner Magnet oder ein Eisenteilchen festsetzen würde. Auf dieselbe Weise können wir für jeden Punkt des Feldes die Richtung der Kraftlinien bestimmen. Die kleinen Pfeile in Fig. 85 zeigen, wie die Kraftlinien vom N.-Pole auslaufen und im Bogen zum S.-Pole führen. Man vergleiche diese Figur mit den Linien von Fig. 61. Daher haben wir uns vorzustellen, dass jeder Magnet von diesen magnetischen Linien durchdrungen ist, und dass dieselben sich in den umgebenden Raum erstrecken. Die Gesammtzahl der magnetischen Linien, welche durch einen Magnet führen, nennt man seine magnetische Flut (Art. 332).

143. Ein magnetisches Paradoxon. Hält man den nordsuchenden Pol eines starken Magnets in einiger Entfernung von dem gleichnamigen Pole eines schwachen Magnets, so stösst er denselben ab. Wird er jedoch ganz dicht an denselben gebracht, so *zieht* er ihn an. Dieser paradoxe Versuch erklärt sich aus dem Umstande, dass der Magnetismus, welchen der kräftige Magnet in dem schwächern induziert, von entgegengesetzter Art ist und deshalb angezogen wird; und falls nur der kräftige

1) Man vergleiche die Lehre vom Parallelogramm der Kräfte in den Lehrbüchern der Physik.

Magnet nahe ist, so kann dieser induzierte Magnetismus den ursprünglichen Magnetismus des schwachen Magnets überwinden. Der Leser muss beachten, dass bei den meisten Versuchen mit Magnetpolen ähnliche störende Erscheinungen auftreten. Der Magnetismus eines Magnets ist nicht völlig *fixiert,* sondern seine Verteilung ist infolge der Nähe anderer Magnetpole Störungen unterworfen; denn kein Stahl ist so hart, als dass er nicht noch vorübergehend durch magnetische Induktion beeinflusst würde.

XII. VORLESUNG: *Erdmagnetismus.*

144. Der Schiffskompass. Im Art. 87 wurde erwähnt, dass der bei Mechanikern käufliche Kompass aus einer magnetisierten Stahlnadel besteht, welche auf einer feinen Spitze über einer mit den Himmelsgegenden versehenen Karte schwebt. Der **Schiffskompass** hat jedoch eine etwas andere Einrichtung.

Fig. 86 zeigt eine der Einrichtungen des Schiffskompasses, wie derselbe zu nautischen Beobachtungen benutzt wird. Die

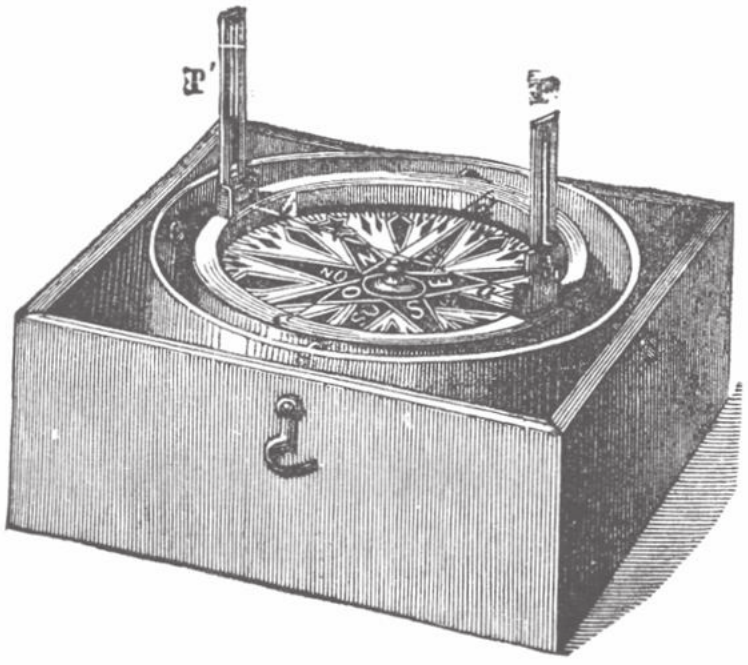


Fig. 86.

in die 32 »Punkte des Kompasses« eingeteilte Karte ist hier an der Nadel befestigt, und dreht sich gleichzeitig mit derselben, so dass der mit N bezeichnete Punkt *der Karte* stets nach Norden

zeigt. Bei den neuesten und besten Schiffskompassen sind mehrere Magnetnadeln nebeneinander gestellt, da es sich herausgestellt hat, dass die Angaben solcher zusammengesetzten Nadeln zuverlässiger sind. Die eisernen Beschläge hölzerner Schiffe und eiserne Schiffe selbst beeinflussen den Kompass, welcher deshalb durch kompensierende, in seiner Nähe befindliche Eisenmassen geschützt werden muss, falls man denselben nicht oben auf einem Maste aufstellen will. Den vom Magnetismus des Schiffes herrührenden Fehler des Kompasses nennt man *Deviation.*

145. Die Erde ein Magnet. Gilbert machte die wichtige Entdeckung, dass die Kompass-Nadel deshalb nach Norden und Süden zeigt, weil die Erde selbst ebenfalls ein grosser Magnet ist. Die Magnetpole der Erde fallen jedoch nicht ganz mit dem geographischen Nordpol, resp. Südpol zusammen. Der magnetische Nordpol der Erde liegt in einer Entfernung von mehr als 1000 Meilen vom geographischen Nordpole, nämlich 70° 5′ nördlicher Breite und 96° 46′ westlicher Länge. Derselbe wurde im Jahre 1831 von J. C. Ross auf der Insel Boothia Felix, gerade auf dem Polarkreise, aufgefunden. Den magnetischen Südpol der Erde hat man bis jetzt noch nicht erreicht; wegen der unregelmässigen Verteilung des Magnetismus scheinen übrigens 2 magnetische Südpole zu existieren.

146. Deklination. Infolge dieser natürlichen Verteilung zeigt die Kompassnadel nicht an allen Orten der Erde nach dem wahren Norden, resp. Süden. In London z. B. zeigte die Kompassnadel im Jahre 1894 ungefähr 17° westlich vom wahren Norden und im Jahre 1900 wird sie 16° 16′ zeigen. Dieser Winkel zwischen dem »magnetischen Meridian« [1]) und dem geographischen Meridian eines Ortes heisst seine magnetische **Deklination.** Die Deklination entdeckte Columbus im Jahre 1492; dieselbe scheint den Chinesen schon früher bekannt ge-

1) Der *magnetische Meridian* eines Ortes ist eine gedachte Ebene, welche man sich durch den Zenith, den magnetischen Nordpol und Südpol gelegt denken kann; man beobachtet die letzteren an einer horizontal aufgehängten Kompassnadel.

wesen zu sein, und soll in Europa von Peter Peregrinus schon zu Anfang des 13. Jahrhunderts beobachtet worden sein. Die Thatsache, dass die Deklination an verschiedenen Punkten der Erdoberfläche eine andere ist, ist ohne Zweifel die Entdeckung des Columbus. —

Damit man sich beim Steuern eines Schiffes nach dem Kompass richten kann, muss man magnetische Karten (Art. 149) anfertigen und die Deklination an verschiedenen Orten genau messen. Die vertikalen Stäbe PP′ des in Fig. 86 abgebildeten »Azimut Kompasses« haben den Zweck, einen Stern in Augenschein zu nehmen, dessen Stellung man aus astronomischen Tabellen kennt, um auf diese Weise den magnetischen Meridian des Ortes mit dem geographischen Meridian vergleichen und den Winkel zwischen ihnen berechnen zu können.

147. Inklination. Der Instrumentenmacher Norman fand im Jahre 1576, dass eine schwebende Magnetnadel das Bestreben hat, mit ihrem Nordende sich nach unten zu neigen. Er fertigte daher eine **Inklinationsnadel** an, welche sich in einer vertikalen Ebene um eine horizontale Achse drehen konnte. Es ergab sich, dass die Inklination in London 71° 50′ betrug. Fig. 87 zeigt eine einfache Form der Inklinationsnadel. Die in dem magnetischen Observatorium zu Kew gebrauchten Inklinatorien sind weit genauere und empfindlichere Instrumente. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass die Inklination ebenso wie die Deklination, an verschiedenen Orten der Erdoberfläche verschieden ist und dass sie jährlichen Aenderungen unterliegt. Die Inklination in London betrug für das Jahr

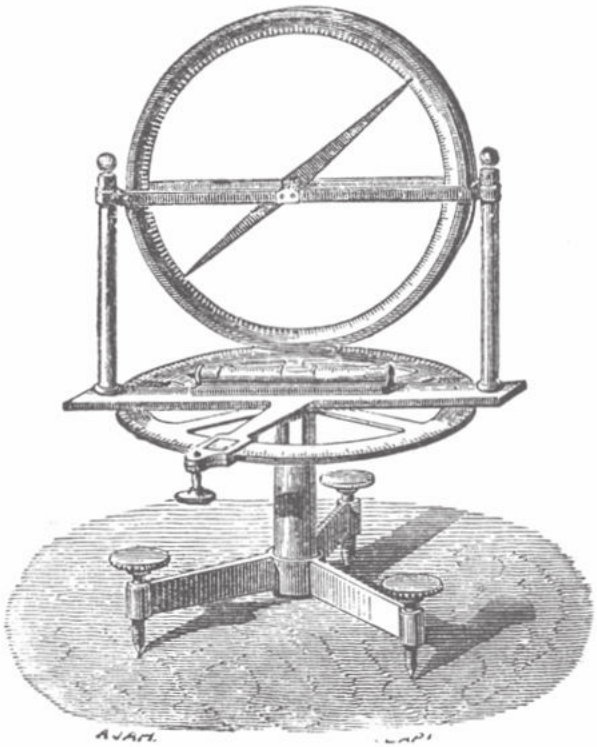


Fig. 87.

1894 67° 18'. Im Jahre 1900 wird dieselbe 67° 9' betragen. Am magnetischen Nordpol stellt sich die Inklinationsnadel aufrecht. Die folgende Tabelle enthält Angaben der Deklination, der Inklination und der totalen magnetischen Kraft für mehrere wichtige Plätze, wobei die Werte annähernd für das Jahr 1900 richtig sind:

	Dekl.	Inkl.	Totale Kraft in C.G.S.-Einheiten.
London	16° 16' W	67° 9' N	0,47
St. Petersburg . . .	0° 30' O	70° 46' N	0,48
Berlin	9° 30' W	66° 43' N	0,48
Paris	14° 30' W	64° 55' N	0,47
Rom	10° 0' W	58° 0' N	0,45
New-York	9° 12' W	70° 6' N	0,61
Washington	4° 35' W	70° 18' N	0,60
San Francisko . . .	16° 42' O	62° 20' N	0,54
Mexiko	8° 0' O	45° 1' N	0,48
St. Helena	25° 0' W	32° 12' S	0,31
Kapstadt	29° 24' W	58° 2' S	0,36
Sydney	9° 36' O	62° 45' S	0,57
Hobarton	25° 0' O	71° 12' S	0,64
Bombay	0° 36' O	20° 38' N	0,37
Tokio	4° 6' W	49° 52' N	0,45

148. Intensität. Um den Magnetismus eines Ortes genau anzugeben, muss man dreierlei kennen, die Deklination, die Inklination und die Intensität der magnetischen Kraft. Letztere wird nach einer der in der vorhergehenden Vorlesung angeführten Methoden gemessen. Ihre Richtung ist die der Inklinationsnadel, welche sich, wie jeder Magnet, längs der Kraftlinien einzustellen strebt. Es ist jedoch praktischer, nicht die totale Intensität der Kraft in der Richtung der Inklination, sondern bloss die horizontale Komponente der Kraft, d. h. denjenigen Teil der Kraft, welcher in die Richtung der horizon-

talen Kompassnadel fällt, zu messen, aus welcher die totale Kraft berechnet werden kann, wenn man die Inklination kennt[1]). Oder wenn die horizontale und die vertikale Komponente der Kraft bekannt sind, so können sowohl die totale Kraft als auch der Winkel der Inklination berechnet werden[2]). Die horizontale Komponente der Kraft oder die »Horizontal-Intensität« findet man entweder durch die Methode der Schwingungen oder durch die Methode der Ablenkung. Die mittlere Horizontalkraft des Erdmagnetismus betrug für das Jahr 1890 in London 0,1823 Krafteinheiten, die mittlere Vertikalkraft 0,4377 und die totale Kraft (in der Inklinationslinie) 0,4741 Krafteinheiten. Die Verteilung der magnetischen Kraft an verschiedenen Orten der Erdoberfläche ist unregelmässig, und variiert in den verschiedenen Breiten nach einem Näherungsgesetze, welches Biot aufstellte und wonach die Kraft dem Ausdrucke $\sqrt{1 + 3 \sin^2 l}$ proportional ist, wo l die magnetische Breite bedeutet.

149. Magnetische Karten. Es ist zweckmässig, magnetische Karten anzufertigen, auf welche Angaben, wie die der letzten Tabelle, eingetragen werden können. Derartige Karten können in verschiedener Weise angefertigt werden. So könnte man z. B. auf einer Karte von England überall die Richtung der Magnetnadel angeben oder die Kraftlinien verzeichnen. Besser ist es, auf der Karte diejenigen Orte anzugeben, an welchen die Deklination dieselbe ist, und diese Orte durch eine Linie zu verbinden. In Plymouth zeigt die Magnetnadel im Jahre 1900 18° westlich vom geographischen Norden. In Lynton, Shrewsburg, und Berwick ist die Deklination für jenes Jahr ebenso gross, wie in Plymouth. Deshalb kann eine Linie, welche diese Städte verbindet, *eine Linie gleicher Deklination* oder eine **isogonische Linie** genannt werden. Wir könnten in ähnlicher

1) Denn ist H die horizontale Komponente der Kraft, I die totale Kraft und Θ der Inklinationswinkel, so ist $I = \frac{H}{\cos \Theta}$.

2) Denn $H^2 + V^2 = I^2$, wo V die vertikale Komponente der Kraft bedeutet.

Weise eine magnetische Karte anfertigen, auf welcher alle diejenigen Linien verzeichnet wären, welche Orte mit gleicher *Inklination* verbinden; solche Linien heissen **Isoklinen.** In England gehen sie von West-Süd-West nach Ost-Nord-Ost. Auf dem Globus gehen die isogonischen Linien grösstenteils vom magnetischen Nordpole nach der magnetischen Südpolarregion, doch ist ihre Gestalt infolge der unregelmässigen Verteilung des Erdmagnetismus ziemlich verwickelt. Die Isoklinen des Globus führen um die Erde wie die Breitenkreise, sind jedoch ebenfalls von unregelmässiger Gestalt. So läuft z. B. diejenige Linie, welche die Orte verbindet, an welchen der Nordsuchende Pol der Magnetnadel eine Inklination von 70° hat, quer durch England und Wales, geht durch Süd-Irland, durchschneidet alsdann den Atlantischen Ozean in südwestlicher Richtung, führt durch die Vereinigten Staaten mit nördlicher Abweichung und trifft gerade die südliche Spitze der Halbinsel Alaska. Dann geht sie beim Durchschneiden von China wieder etwas südwärts, krümmt sich jedoch beim Eintritt in russisches Gebiet wieder nach Norden. Schliesslich durchschneidet sie den südlichen Teil der Ostsee und führt durch die Nordsee nach England zurück.

150. Variationen des Erdmagnetismus. Wir haben bereits erwähnt, dass Deklination wie Inklination mehrfachen Aenderungen unterworfen sind; einige diese Aenderungen gehen sehr langsam vor sich, andere finden jedes Jahr statt, und noch andere jeden Tag.

Diejenigen Aenderungen, welche sich erst nach vielen Jahren wiederholen, heissen *säkulare Aenderungen.*

Die Variationen der *Deklination* sind erst seit dem Jahre 1580 aufgezeichnet: die Magnetnadel zeigte damals in London 11° östlich vom geographischen Norden. Diese östliche Deklination nahm allmählich ab, bis die Nadel im Jahre 1657 genau nach Norden zeigte. Dann bewegte sie sich weiter nach Westen, und erreichte um das Jahr 1816 ein Maximum von 24° 27'. Von dieser Zeit an ist die Deklination langsam bis auf ihren augenblicklichen Wert von 16' 57' herabgesunken; in England

nimmt sie jährlich um circa 7′ ab. Um das Jahr 1976 wird die Nadel wieder genau nach Norden zeigen, indem sie in etwa 320 Jahren einen vollständigen Cyklus von Aenderungen ausführt.

Die *Inklination* betrug 71° 50′ für das Jahr 1576 und nahm langsam bis zum Jahre 1720 zu, wo der Inklinationswinkel den Maximalwert von 74° 42′ erreichte. Seitdem hat die Inklination beständig abgenommen bis auf ihren augenblicklichen Wert von 67° 39′. Die Periode, in welcher ein Cyklus vollendet wird, ist nicht bekannt, doch ist die Aenderung der Inklination augenblicklich verhältnissmässig geringer, als vor 50 Jahren. Auf der ganzen Erde ändern sich nach und nach Deklination und Inklination. Die folgende Tabelle enthält die Angaben der säkularen Aenderungen in London.

Jahr	Deklination.	Inklination.	Jahr	Deklination.	Inklination.
1576	—	71° 50′	1780	—	72° 8′
1580	11° 17′ O	—	1800	24° 6′	70° 35′
1600	—	72° 0′	1816	24° 30′ max.	—
1622	6° 12′	—	1830	24° 2′	69° 3′
1634	4° 0′	—	1855	23° 0′	—
1657	0° 0′ min.	—	1868	20° 33′	68° 2′
1676	3° 0′ W.	73° 30′	1878	19° 14′	67° 43′
1705	9° 0′	—	1880	18° 40′	67° 40′
1720	13° 0′	74° 42′ max.	1890	17° 26′	67° 23′
1760	19° 30′	—	1900	16° 16′	67° 9′

Der Wert der *totalen magnetischen Kraft* oder der »Intensität« ändert sich ebenfalls allmählich. In der Nähe von London ergab die Messung der Insensität 0,4791 Krafteinheiten im Jahre 1848, 0,4740 im Jahre 1866, im Jahre 1880 0,4736 Krafteinheiten und im Jahre 1890, 0,4741 Krafteinheiten [1]).

151. Tägliche Aenderungen. Bei genauer Beobachtung

1) D. h. ein magnetischer Nordpol von der Stärke 1 wird in der Richtung der Inklinationsnadel von einer mechanischen Kraft von etwas weniger als einer halben Krafteinheit getrieben.

zeigen Deklinations- und Inklinationsnadel kleine tägliche Schwankungen. Um 7 Uhr vormittags beginnt die Kompassnadel eine Bewegung nach Westen und das dauert bis 1 Uhr nachmittags; nachmittags bewegt sich die Nadel langsam nach Osten zurück, bis circa 10 Uhr abends; hierauf bleibt sie in Ruhe; aber im Sommer fängt die Nadel ungefähr um Mitternacht wieder eine schwache Bewegung nach Westen an, und dreht dann noch vor 7 Uhr morgens wieder nach Osten um. Diese geringen Schwankungen — sie betragen nie mehr als 10′ — scheinen mit der Stellung der Sonne im Zusammenhange zu stehen; auch übt der Mond einen schwachen Einfluss auf die Stellung der Nadel aus.

152. Jährliche Aenderungen. Es findet auch eine jährliche Aenderung statt, welche der Bewegung der Erde um die Sonne entspricht. In Gross-Britannien ist die totale Kraft im Juni am grössten und im Februar am schwächsten, aber auf der südlichen Halbkugel, in Tasmanien ist es gerade umgekehrt. Die Inklination ist ebenfalls je nach der Jahreszeit verschieden, und zwar ist der Inklinationswinkel in England während der vier Sommermonate kleiner als die übrige Zeit des Jahres.

153. Die 11-jährige Periode. Der General Sabine fand, dass alle 11 Jahre eine beträchtlichere Aenderung der Deklination stattfindet. Schwabe bemerkte, dass die Wiederkehr dieser Perioden mit den 11jährigen Perioden zusammenfällt, wo wir ein Maximum von *Sonnenflecken* haben. Professor Balfour Stewart und andere haben versucht, eine gleiche periodische Wiederkehr des **Nordlichts** [1]) und anderer Naturerscheinungen festzustellen.

154. Magnetische Stürme. Man hat bisweilen beobachtet, dass eine plötzliche (obgleich sehr geringe) unregelmässige Störung bei allen Kompassnadeln eines beträchtlichen Gebietes der Erdoberfläche stattfindet. Solche Erscheinungen sind als magnetische Stürme bekannt; sie treten häufig gleichzeitig mit einem Nordlichte auf.

155. Selbst-aufzeichnende magnetische Apparate.

---

1) Vergl. Vorlesung XXIV, über Atmosphärische Elektrizität.

In Kew und andern magnetischen Observatorien werden die täglichen und stündlichen Variationen der Magnetnadel in einem fortlaufenden Register verzeichnet. Man verfährt dabei auf folgende Weise: Von einer Lampe lässt man einen Lichtstrahl auf einen kleinen Spiegel fallen, welcher an dem Magnet angebracht ist, dessen Bewegung man beobachten will. Auf diese Weise wird ein heller Fleck auf einen Streifen Photographie-Papier reflektiert, welches so präpariert ist, dass es für Licht empfänglich ist. Durch ein Uhrwerk wird das Papier beständig weiter bewegt, und wenn der Magnet in Ruhe ist, so besteht die dunkle Spur auf dem Papier einfach aus einer geraden Linie. Bewegt sich aber der Magnet seitwärts, so verschiebt sich der vom Spiegel reflektierte Lichtfleck, und die photographierte Linie ist alsdann eine Kurve. Es steht zu erwarten, dass man durch Vergleichung solcher Aufzeichnungen von »*Magnetographen*« an weit von einander entfernten Beobachtungsstationen noch mehr Aufschluss über die Ursache des Erdmagnetismus und seiner Variationen erhält, worüber man bisher noch nichts gewisses feststellen konnte. Schuster hat gezeigt, dass diese Aenderungen im Allgemeinen eine äussere, nicht eine innere Ursache haben.

156. Theorie des Erdmagnetismus. Die Erscheinung der Erdströme (Art. 228) scheint mit den Variationen des Erdmagnetismus im Zusammenhange zu stehen und lässt sich stets beim Auftreten eines Nordlichts oder während eines magnetischen Sturmes beobachten; doch ist bis jetzt noch nicht festgestellt, ob diese Ströme von den Variationen des Erdmagnetismus herrühren oder ob umgekehrt diese Variationen eine Folge der Ströme sind. Man weiss, dass die Verdunstung (Art. 71), welche in den Tropen beständig vor sich geht, zur Folge hat, dass die aufsteigenden Ströme erhitzter Luft im Vergleich zur Erde + elektrisch werden. Diese Luftströme bewegen sich nordwärts und südwärts nach den kältern Polargegenden, wo sie dann niedersinken. Diese elektrischen Luftströme wirken wie wirkliche elektrische Ströme (Art. 392), und da sich die Erde in ihnen dreht, so wird auf dieselbe ein magnetischer Einfluss aus-

geübt. Der Verfasser hat 12 Jahre lang die Ansicht vertreten, dass nur mit Hilfe dieser thermodynamischen Erzeugung der Polarströme in Verbindung mit der täglichen Drehung der Erde sich das Wachsen des Erdmagnetismus bis zu seiner augenblicklichen Stärke wirklich erklären lässt. Durch die Einwirkung der Sonne und des Mondes bei Ebbe und Flut in der Atmosphäre liessen sich die in Art. 150 erwähnten Variationen ebenfalls erklären. Man muss beachten, dass bei allen magnetischen Stürmen die grössten Störungen in den den Polen am nächsten liegenden Gegenden statt finden, und dass die Magnetpole fast genau mit den Gegenden der grössten Kälte zusammenfallen; dass die Gegend, wo das Nordlicht am stärksten auftritt, sich fast symmetrisch um den Magnetpol herum erstreckt. Wir können noch hinzufügen, dass die schwachen täglichen Erdströme im Allgemeinen von den Polen nach dem Aequator zu gerichtet sind.

KAPITEL III.

ELEKTRISCHE STRÖME.

XIII. VORLESUNG: *Einfache Volta'sche Elemente.*

157. Es wurde bereits in der 4. Vorlesung erwähnt, dass die Elektrizität aus einem geladenen Körper durch einen beliebigen Leiter, wie z. B. durch einen Draht oder einen angefeuchteten Faden wegfliesst. Wenn man nun durch irgend eine Vorrichtung dafür sorgen könnte, dass dem Körper ebensoviel Elektrizität zugeführt würde, wie aus ihm wegfliesst, so würde man einen kontinuierlichen **Strom** erhalten. Ein solcher Strom fliesst stets durch einen leitenden Draht, falls seine beide Enden auf ungleichen elektrischen Potentialen erhalten werden, gerade so wie ein Wärmestrom durch einen Metallstab fliesst, wenn seine Enden auf ungleichen Temperaturen erhalten werden, indem die Wärme stets von dem Ende mit höherer Temperatur nach dem Ende mit geringerer Temperatur strömt. Wir wissen nicht, in welcher Richtung der Strom in einem Drahte fliesst, aber es ist zweckmässig anzunehmen, dass die Elektrizität vom + Ende zu dem — strömt, oder mit andern Worten: dass ein elektrischer Strom in der Richtung vom hohen Potential zum niedrigen fliesst. Es ist klar, dass ein solcher Strom beide Enden auf dasselbe Potential zu bringen strebt. Um einen kontinuierlichen Strom zu erhalten, muss man einen geschlossenen Stromkreis haben. Man hat den »Strom« bisweilen als einen doppelten aufgefasst, indem die + Elektrizität in der einen

Richtung und die — Elektrizität in der entgegengesetzten Richtung fliessen soll. Der einzige Beweis, welcher diese ganz überflüssige Annahme unterstützt, ist die Thatsache, dass sich bei der Zersetzung von Flüssigkeiten durch den Strom die Atome teils an der Stelle ansammeln, wo der Strom in die Flüssigkeit eintritt, teils an der Stelle, wo derselbe aus der Flüssigkeit austritt.

Die elektrische Menge, welche von einem Strome weiter geführt wird, ist dem Strome und der Zeit, während welcher er fliesst, proportional. Die praktische Stromeinheit heisst *Ampère* (vergl. Art. 202 und 249). Die elektrische Menge, welche durch einen Strom von einem *Ampère* in einer Sekunde weiter geführt wird, heisst eine *Ampère-Sekunde* oder ein *Coulomb*. Eine *Ampère-Stunde* ist gleich 3600 Coulomb. Bezeichnet C die Anzahl der Ampère, t die Anzahl der Sekunden, während welcher der Strom fliesst, und Q die Anzahl der hiebei weiter geführten Coulomb, so haben wir die Formel:

$$Q = C.\ t$$

Die Ströme heissen *kontinuierlich*, wenn sie ohne Unterbrechung in derselben Richtung fliesen. Sie heissen *Wechselströme*, wenn sie fortwährend in bestimmten Intervallen ihre Richtung umkehren, indem sie den Stromkreis zuerst in dieser, dann in der entgegengesetzten Richtung durchfliessen. Kontinuierliche elektrische Ströme, wie wir sie soeben beschrieben haben, werden gewöhnlich durch *Volta'sche Elemente* oder durch *Batterieen* solcher Elemente oder auch durch Dynamomaschinen erzeugt, obschon es noch andere Mittel zur Erzeugung von Strömen giebt, welche später erwähnt werden sollen. Wechselströme werden durch besondere Wechselstrommaschinen erzeugt, von denen später (Art. 465) die Rede sein soll.

158. Die Entdeckungen Galvani's und Volta's. Die Entdeckung elektrischer Ströme datiert seit *Galvani*, einem Arzte in Bologna, welcher um das Jahr 1786 eine Reihe merkwürdiger und wichtiger Beobachtungen über die konvulsivischen Bewegungen anstellte, die der »Rückschlag« (Art. 29) und andere elektrische Entladungen an einem Froschschenkel hervorbringen.

Hierbei machte er dann die Entdeckung, dass es nicht notwendig sei, zur Hervorbringung dieser Erscheinungen eine elektrische Maschine zu benutzen, sondern dass ein ähnliches konvulsivisches Zucken in dem Froschschenkel hervorgerufen wurde, wenn er zwei ungleiche Metalle, z. B. Eisen und Kupfer, mit einem Nerv resp. einem Muskel und dann mit einander in Berührung brachte. Galvani glaubte, dass diese Erscheinung eine Folge der vom Froschschenkel selbst erzeugten Elektrizität sei. Dagegen wies *Volta,* Professor an der Universität zu Pavia, nach, dass die Elektrizität nicht von dem Muskel oder dem Nerv, sondern von der Berührung der ungleichen Metalle herrühre. Wenn zwei Metalle, welche beide mit der Luft oder einem andern oxydierenden Medium in Berührung sind, zur gegenseitigen Berührung gebracht werden, so wird die Oberfläche des einen Metalls +, die des andern — elektrisch, wie bereits am Ende der 7. Vorlesung festgestellt wurde. Obgleich die Ladungen sehr schwach sind, bewies Volta ihre Existenz auf doppelte Weise.

159. Die Volta'sche Säule. Volta's zweiter Beweis war weniger direkt, aber desto überzeugender. Er wies nach, dass, wenn mehrere solcher Berührungen ungleicher Metalle derart stattfinden, dass ihre elektrischen Wirkungen sich summieren, dieselben im Verhältnis der Anzahl der Berührungen kräftiger sind. Zu dem Zwecke konstruierte er den Apparat, welcher zu Ehren des Entdeckers den Namen **Volta'sche Säule** erhielt. (Fig. 88). Dieselbe wird in folgender Weise aufgebaut: Auf eine Zinkplatte wird eine Kupferplatte gelegt, so dass sie einander berühren, dann auf die Kupferplatte ein mit Salzlösung getränkter Flanellappen oder ein Stück Löschpapier, dann ein zweites Plattenpaar von Zink und Kupfer, und so weiter, so dass jedes Plattenpaar der Säule von dem folgenden durch einen feuchten Leiter getrennt ist. Eine solche *Säule* erzeugt dann, wenn sie aus einer Reihe solcher Plattenpaare besteht, eine hinreichende Elektrizitäts-

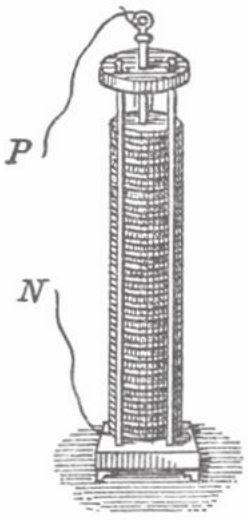


Fig. 88.

menge, um einen empfindlichen Schlag zu geben, wenn man die oberste und die unterste Scheibe oder die sie verbindenden Drähte gleichzeitig mit den nass gemachten Fingern berührt. Wird ein einzelnes Plattenpaar zur Berührung gebracht, so wird die eine Platte bis zu einem gewissen Grade schwach + elektrisch, die andere — elektrisch, oder mit andern Worten, es besteht zwischen ihnen eine gewisse elektrische Potentialdifferenz (vergl. Art. 260). Werden aber mehre Plattenpaare auf die angegebene Weise zusammengefügt, so dass die aufeinanderfolgenden Paare durch feuchte Leiter getrennt sind, so wird die Potentialdifferenz zwischen der ersten Zinkscheibe und der letzten Kupferscheibe im Verhältnis der Anzahl der Plattenpaare vergrössert; denn jetzt summieren sich alle aufeinanderfolgenden kleinen Potentialdifferenzen.

160. Der Becherapparat. Eine andere von Volta erfundene Zusammenstellung ist sein *Becherapparat.* Derselbe besteht aus einer Anzahl von Bechern (Fig. 89), welche sämtlich

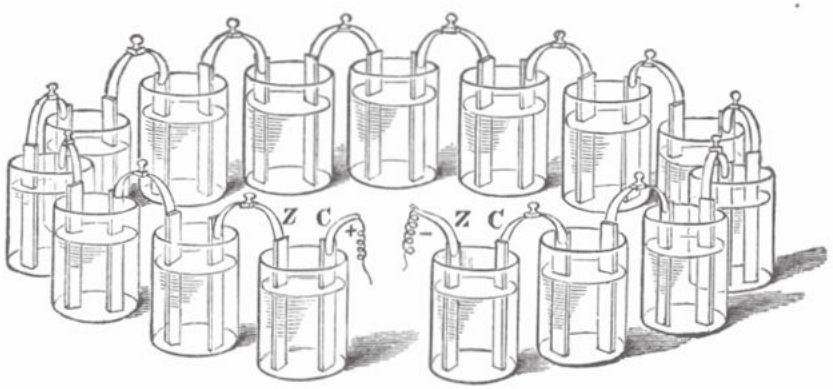


Fig. 89.

mit Salzlösung oder verdünnter Säure angefüllt sind. In diese tauchen eine Anzahl halb aus Zink, halb aus Kupfer zusammengelöteter Metallstreifen, und zwar derart, dass das Zink eines Streifens in den einen Becher, und das Kupfer desselben Streifens in einen zweiten Becher taucht. Die Potentialdifferenz zwischen dem ersten und letzten Becher ist dann wieder der Anzahl der Metallstreifen proportional. Dieser Apparat ist kräftig genug, um eine elektrische Glocke zu läuten, deren Drähte an dem ersten Zinkstreifen und dem letzten Kupferstreifen befestigt sind,

obschon der Apparat sich für diesen Zweck wenig eignet. Den elektrischen Vorgang bei diesem Apparate macht man sich am besten klar, wenn man die Erscheinungen eines einzelnen Bechers oder *Elementes* studiert.

161. Einfaches Volta'sches Element. In einen Glaskrug giesse man etwas Wasser, mit welchem etwas Schwefelsäure oder eine andere oxydierende Säure vermischt ist (Fig. 90). Dann tauche man zwei getrennte, reine Metallstreifen in die Flüssigkeit, einen von Zink Z und einen von Kupfer C. Dieses Element liefert einen kontinuierlichen elektrischen Strom, welchen man durch einen Draht fliessen lassen kann, dessen Enden mit den beiden Metallstreifen in Verbindung stehen. So lange der Strom fliesst, bemerkt man, dass der Zinkstreifen allmählich verbraucht wird; und daher rührt in der That die Energie, welche erforderlich ist, den Strom durch das Element und den damit verbundenen Draht zu treiben. Man kann daher das Element als eine Art von chemischem Schmelzofen betrachten, in welchem Brennmaterial verbraucht wird, um den Strom zu treiben. Das Zink ist die Feuerung[1]), die Säure ist die Nahrung, während das Kupfer nur eine metallische Hand ist, welche in das Element taucht, um den Strom aufzusammeln, ohne sich dabei chemisch zu ändern. Bevor man die Metallstreifen durch einen Draht verbindet, zeigt das Elektrometer keine merkliche Potentialdifferenz zwischen dem Kupfer und dem Zink an; da ersteres nur das

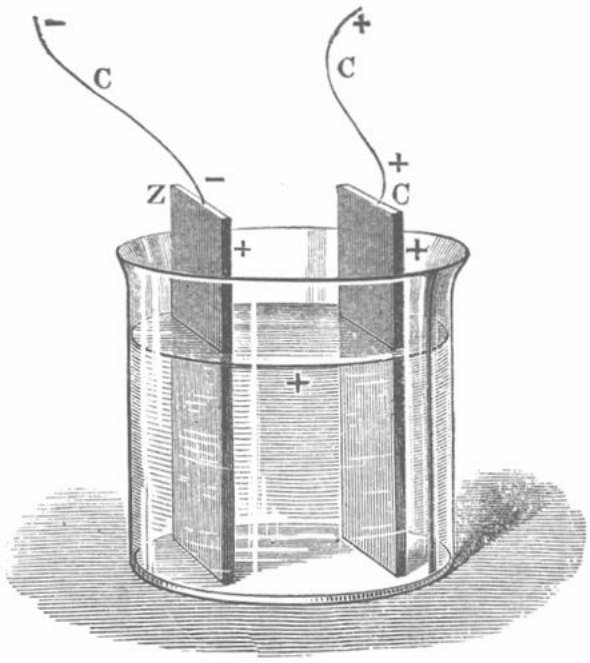


Fig. 90.

1) Zink verbrennt bekanntlich in Sauerstoffgas mit blauer Flamme unter Wärmeabgabe. Zinkfolie lässt sich leicht entzünden.

Potential an einer Stelle in der Luft oder einem andern oxydierenden Medium ausserhalb des Zinks oder Kupfers, und nicht die Potentiale der Metalle selbst misst. Das Zink löst sich auf und treibt einen Strom zum Kupfer, während dieses sich weniger stark auflöst und einen Strom in entgegengesetzter Richtung treibt. Das Zink selbst hat ein Potential, welches ungefähr 1,86 Volt höher ist, als das der es umgebenden oxydierenden Media (vergl. Art. 484); während das Potential des Kupfers nur circa 0,81 Volt höher ist, da das Kupfer nicht so leicht oxydiert. Zwischen dem Kupfer und dem Zink besteht also eine latente Potentialdifferenz von circa 1,05 Volt; hierdurch entsteht aber erst dann ein Strom, wenn eine metallische Berührung stattfindet. Berühren sich die Metallstreifen, oder werden dieselben durch ein Paar Metalldrähte verbunden, so strömt die Elektrizität sofort durch die Säure vom Zink zum Kupfer, wie die Pfeile in der Figur es andeuten, und der Strom kehrt durch den Metallschliessungsbogen vom Kupfer zum Zink zurück. Ein kleiner Teil des Zinks wird gleichzeitig aufgelöst, indem das Zink seine latente Energie in dem Masse verliert, wie seine Atome sich mit der Säure verbinden. Diese Energie wird dadurch verbraucht, dass eine elektrische Entladung durch die Säure hindurch nach dem Kupferstreifen bewerkstelligt wird, und von dort durch den Draht nach dem Zinkstreifen zurück. Der Kupferstreifen, von dem der Strom seinen Weg durch den *äussern* Verbindungskreis beginnt, heisst der *positive Pol*, und der Zinkstreifen der *negative Pol*. Werden zwei Kupferdrähte an die Enden der beiden Metallstreifen befestigt, so fliesst allerdings kein Strom, so lange die beiden Drähte getrennt sind, doch findet man, dass der mit dem Zink verbundene Draht negativ, und der mit dem Kupfer verbundene positiv elektrisch ist, da das Zink das *Bestreben* hat, zu oxydieren und die Elektrizität durch das Element hindurch vom Zink zum Kupfer zu treiben. Dieser Zustand ist in Figur 90 durch die + und — Zeichen angedeutet; und diese Potentialverteilung führte einige zu der Ansicht, dass die Verbindungsstelle des Zinks mit dem Kupferdrahte der Ausgangspunkt des

Stromes sei. Allein der wirkliche Ausgangspunkt liegt im Elemente an der Zinkoberfläche, wo der chemische Prozess die Energie liefert; denn von dieser Stelle verbreiten sich durch die Flüssigkeit gewisse elektro-chemische Kräfte (welche im 11. Kapitel ausführlicher behandelt sind), infolge deren die Potentialdifferenz beständig erneuert wird. Gleichzeitig bemerkt man, dass an der Oberfläche der Kupferplatte kleine Blasen von Wasserstoffgas erscheinen. Diese beiden Vorgänge dauern so lange wie die Drähte verbunden sind und einen geschlossenen Kreis bilden. Das metallische Zink können wir als einen Vorrat von Energie betrachten. Wir wissen, dass dasselbe beim Verbrennen in Sauerstoff oder Luft diesen Vorrat von Energie als Wärme abgiebt. Wird dasselbe auf diesem rein chemischen Wege in einem Elemente verbrannt, so tritt seine Energie nicht als Wärme, sondern als elektrische Energie auf, d. h. als Energie eines elektrischen Stromes, der durch eine elektromotorische Kraft getrieben wird.

162. Wirkungen des Stromes. Den Strom selbst kann man nicht durch den Schliessungsdraht fliessen *sehen;* um daher zu beweisen, dass ein einzelnes Element oder eine Verbindung mehrerer einen Strom erzeugt, muss man einige der *Wirkungen* kennen, welche durch Ströme hervorgebracht werden können. Diese Wirkungen sind verschiedener Art. Ein durch einen dünnen Draht fliessender Strom erhitzt denselben; fliesst er in der Nähe einer Magnetnadel, so wird dieselbe durch ihn abgelenkt; fliesst er durch Wasser oder andere Flüssigkeiten, so werden dieselben zersetzt; und endlich, fliesst der Strom durch lebende Körper oder irgend einen empfindungsfähigen Teil derselben, so erzeugt er gewisse Empfindungen. Diese thermischen, magnetischen, chemischen und physiologischen Wirkungen sollen in besondern Vorlesungen behandelt werden.

163. Volta'sche Batterie. Vereinigt man mehrere solcher einfachen Elemente, indem man die Zinkplatte des einen mit der Kupferplatte des folgenden verbindet, und so weiter, so erhält man eine grössere Potentialdifferenz zwischen dem

»Kupferpole« an dem einen Ende und dem »Zinkpole« an dem andern Ende der Reihe. Werden daher die beiden Pole durch einen Draht verbunden, so entsteht ein stärkerer elektrischer Strom, als wenn man bloss ein Element benutzt. Eine solche Vereinigung Volta'scher Elemente heisst eine Volta'sche **Batterie** [1]). Es giebt verschiedene Methoden, die Elemente einer Batterie aufzustellen, von denen besonders folgende zwei erwähnt werden müssen. Verbindet man die Elemente wie in Fig. 89 oder Fig. 91 hinter einander, so spricht man von einer Aufstellung *in Reihen.* Es ist üblich, ein Element symbolisch in der Weise darzustellen, dass eine kurze dicke Linie die Zinkplatte, und eine lange dünne Linie die Kupfer-(oder Kohle-) Platte bedeutet. Fig. 91 stellt

Fig 91

Fig. 92.

z. B. 4 in Reihen aufgestellte Elemente dar. Bei dieser Anordnung liefern sie denselben Strom, d. h. dieselbe Anzahl von Ampère, wie ein einfaches Element, aber sie geben diesen Strom mit der 4-fachen elektromotorischen Kraft, d. h. mit der 4-fachen Anzahl von Volt.

Die andere Methode, die Elemente aufzustellen, besteht darin, alle Zinkplatten einerseits und alle Kupfer-(oder Kohle-) Platten andrerseits mit einander zu verbinden. Man nennt die Elemente dann *parallel geschaltet* oder »auf Quantität« verbunden. Bei dieser Anordnung haben sie keine grössere elektromotorische Kraft als ein einzelnes Element. Alle Zinkplatten wirken zusammen wie eine grosse Zinkpatte, und ebenso alle Kupferplatten. Allein

1) Einige Schriftsteller nennen sie Galvani'sche Batterie, zu Ehren Galvani's; doch das Verdienst gebührt jedenfalls Volta. Die in Strömen fliessende Elektrizität wird bisweilen Volta'sche Elektrizität genannt oder Galvani'sche Elektrizität oder oft auch Galvanismus; doch unterscheidet sie sich, wie wir sehen werden, von der Reibungselektrizität oder irgend einer andern Elektrizität nur graduell, und beide Arten können durch Drähte fliessen und Eisen magnetisieren und chemische Verbindungen auflösen.

sie liefern mehr Strom. Fig. 92 zeigt 4 parallel geschaltete Elemente, welche 4 mal so viel Strom liefern als ein einziges Element.

164. Elektromotorische Kraft. Der Ausdruck »*elektromotorische Kraft*« wird gebraucht, um diejenige Kraft zu bezeichnen, welche die Elektrizität von einer Stelle zur andern führt oder zu führen strebt. Zur Abkürzung werden wir dieselbe bisweilen durch E.M.K. bezeichnen [1]). In diesem besondern Falle ist sie offenbar eine Folge der Potentialdifferenz und derselben proportional. Gerade so, wie eine *Niveaudifferenz* in Wasserröhren einen *Druck* erzeugt, und letzterer einen Strahl, sobald der Hahn geöffnet wird, ebenso erzeugt eine *Potentialdifferenz elektromotorische Kraft*, und diese einen *Strom*, sobald der Schliessungsbogen vollständig ist, um die Elektrizität durchströmen zu lassen. Elektromotorische Kraft kann daher bisweilen passend als eine Potentialdifferenz bezeichnet werden und *umgekehrt;* doch darf der Leser den Unterschied nicht vergessen. Die Einheit der E.M.K. heisst *Volt* (vergl. Art. 349).

165. Volta's Gesetze. Volta zeigte (Art. 79), dass die Potentialdifferenz zweier sich (in Luft) berührender Metalle nur von der Substanz derselben, nicht von ihrer Grösse, noch von der Grösse der Berührungsstelle abhängt. Er zeigte auch, dass, wenn sich mehrere Metalle berühren, die Potentialdifferenz zwischen dem ersten und letzten der Reihe dieselbe ist, wie in dem Falle, wo sich die beiden unmittelbar berühren. Einige quantitative Angaben der Untersuchungen von Ayrton und Perry finden sich in Art. 80. Bei einer Reihe von Elementen ist jedoch die Sache

---

1) Der Anfänger darf »elektromotorische Kraft« oder diejenige Kraft, welche die Elektrizität zu bewegen strebt, nicht mit elektrischer »Kraft« verwechseln, d. h. jener Kraft, mit welcher die Elektrizität die Materie zu bewegen strebt. Newton hat ein für allemal den Begriff »Kraft« virtuell als dasjenige definiert, das die Materie bewegt oder zu bewegen strebt. Wird die Materie von einem Magnet bewegt, so sprechen wir ganz richtig von magnetischer Kraft; ebenso von elektrischer Kraft, wenn die Materie von der Elektrizität in Bewegung gesetzt wird. Aber die E.M.K. ist etwas ganz anderes, und überhaupt keine »Kraft«, denn sie wirkt nicht auf die Materie, sondern auf die Elektrizität und strebt diese zu bewegen.

anders, als bei einer blossen Reihe von Metallen. Wenn man die Zinkplatten und Kupferplatten der Elementenreihe alle in derselben Reihenfolge aufstellt, so dass sie alle elektromotorische in derselben Richtung erregen, so ist die Kräfte *gesamte elektromotorische Kraft der Reihe gleich derjenigen eines Elements, multipliziert mit der Anzahl der Elemente.*

Bisher haben wir bloss Zink und Kupfer als Bestandteile einer Batterie erwähnt; doch kann man zwei beliebige Metalle dazu benutzen. Die E.M.K. eines Elements hängt von der *Differenz* der beiden Metalle ab. Wollte man ein Element aus zwei Zinkplatten konstruieren, so würde man keinen Strom erhalten, denn jede der beiden Platten wurde sich auflösen und mit derselben Stärke einen Strom zur andern senden. Dasjenige Element besitzt die grösste elektromotorische Kraft, oder wirkt am »stärksten«, zu welcher man 2 Metalle nimmt, welche die grösste Differenz bei ihrer chemischen Verbindung mit der Säure zeigen, oder welche in der »Kontakt-Reihe«, Art. 80, am weitesten von einander entfernt sind. Zink und Kupfer eignen sich in dieser Beziehung sehr gut; Zink und Silber würden, abgesehen von den Kosten, noch besser sein. Für kräftigere Batterieen ist eine Zusammenstellung von Zink und Platin oder von Zink und Kohle vorzuziehen. Dasjenige Metall, durch welches der Strom in die Flüssigkeit eintritt, heisst die *Anode;* es ist diejenige Platte, welche sich auflöst. Das Metall, bei welchem der Strom das Element verlässt, heisst die *Kathode;* diese löst sich nicht auf, und erhält in vielen Fällen einen Niederschlag auf ihrer Oberfläche.

166. Widerstand. Dieselbe elektromotorische Kraft erzeugt jedoch nicht in allen Fällen einen Strom von derselben *Stärke.* Die Stromstärke hängt nicht allein von der Kraft ab, welche die Elektrizität durch den Schliessungskreis zu treiben strebt, sondern auch von dem **Widerstande,** auf welchen dieselbe während des Fliessens trifft und den sie zu überwinden hat. Wenn man die Elemente mit Sand oder Sägespähne zum Teil verstopft (wie dies bisweilen bei den sogenannten Säge-

späne-Batterieen geschieht, um sie brauchbar zu erhalten) oder wenn der Draht, welcher den Schliessungskreis vollständig macht, sehr lang oder sehr dünn ist, so geht die Wirkung zum Teil verloren, und der Strom ist schwächer, obgleich die E.M.K. unverändert ist. Die Analogie mit den Wasserröhren kann auch hier zu Hilfe genommen werden. Der Druck, welcher das Wasser durch Röhren treibt, ist von der Niveaudifferenz zwischen der Cisterne, aus welcher das Wasser fliesst, und dem Gefäss, bis zu welchem es fliesst, abhängig; allein die Wassermenge, welche durch die Röhren hindurchfliesst, hängt nicht allein vom Drucke, sondern auch von dem Widerstande, auf den sie trifft, ab. Denn ist die Röhre sehr dünn oder mit Sand oder Sägspänen verstopft, so fliesst das Wasser nur langsam durch.

Die Metalle leiten den elektrischen Strom im allgemeinen gut; ihr Widerstand ist gering; doch dürfen Drähte aus Metall nicht zu dünn, noch zu lang sein, da sonst ihr Widerstand zu gross, und sie dann nur einen schwachen Strom durchlassen. Die Flüssigkeiten in der Batterie leiten bei Weitem nicht so gut, wie die Metalle; auch bieten verschiedene Flüssigkeiten verschiedene Widerstände. Reines Wasser hat überhaupt kein Leitungsvermögen, und ist für die schwache Elektrizität der Volta'schen Batterie fast ein vollkommener Isolator, obgleich es für die hochgespannte Reibungselektrizität ein guter Leiter ist, wie wir gesehen haben. Wasser, in welchem Salz oder Salpeter aufgelöst ist, ist ein guter Leiter, desgleichen verdünnte Säuren, obschon konzentrierte Schwefelsäure ein schlechter Leiter ist. Den Widerstand der Flüssigkeit in den Elementen kann man nötigenfalls dadurch verringern, dass man grössere Metallplatten anwendet und dieselben näher zusammenrückt. Gase sind schlechte Leiter; daher kommt es, dass die Wasserstoffblasen, welche sich während der Wirksamkeit des Elementes an die Kupferplatte ansetzen, den innern Widerstand des Elementes vermehren, indem sie die wirksame Oberfläche der Platten verkleinern.

XIV. VORLESUNG: *Chemische Vorgänge im Elemente.*

167. Mit der Erregung eines elektrischen Stromes durch ein Volta'sches Element sind stets chemische Vorgänge im Elemente verbunden. Eins der Metalle muss wenigstens leicht oxydierbar sein, und die Flüssigkeit muss so beschaffen sein, dass sie auf das Metall einwirken kann. Die Erfahrung lehrt denn auch, dass Zink und die andern Metalle, welche an dem elektropositiven Ende der Kontakt-Reihe (vergl. Art. 80) stehen, oxydierbar sind, während die elektronegativen Körper — Kupfer, Silber, Gold, Platin und Kohle — weniger leicht oxydieren; die letzten drei widerstehen sogar der Einwirkung jeder Säure. Es lässt sich nicht nachweisen, dass ihr elektrisches Verhalten eine Folge ihres chemischen Verhaltens ist; ebensowenig ist umgekehrt ihr chemisches Verhalten eine Folge ihres elektrischen. Wahrscheinlich entspringen beide aus einer gemeinsamen Quelle (vergl. Art. 80 und Art. 484).

Taucht man ein Stück ganz reines Zink allein in verdünnte Schwefelsäure, so wird dasselbe von der Säure nicht angegriffen. Doch das gewöhnliche käufliche Zink ist nicht rein, und wird aufgelöst, wenn man es in verdünnte Schwefelsäure taucht, indem zahlreiche Wasserstoffblasen von der Oberfläche des Metalls aufsteigen. Schwefelsäure ist ein zusammengesetzter Körper, bei dem jedes Molekül aus einer bestimmten Gruppe von Atomen besteht, nämlich aus 2 Atomen Wasserstoff, 1 Atom Schwefel, und 4 Atomen Sauerstoff: oder symbolisch: H_2SO_4. Der chemische Prozess, bei dem das Zink sich mit dem Radikal der Säure verbindet und der Wasserstoff ausscheidet, lässt sich durch folgende Gleichung ausdrücken:

$$Zn + H_2SO_4 = ZnSO_4 + H_2$$

Zink und Schwefelsäure geben schwefelsaures Zinkoxyd und Wasserstoff.

Das bei diesem Prozesse gebildete schwefelsaure Zinkoxyd bleibt in der Flüssigkeit aufgelöst.

Wenn man nun eine Platte *reines* Zink und eine Platte von

einem weniger leicht oxydierenden Metall — Kupfer oder Platin oder am besten Kohle (die harte Kohle aus den Gasretorten) — nebeneinander in den die Säure enthaltenden Becher taucht, so geht kein wahrnehmbarer chemischer Prozess vor, so lange man den Stromkreis noch nicht geschlossen hat, entweder dadurch, dass man die beiden Platten durch einen Draht verbindet oder dadurch, dass man sie zur unmittelbaren Berührung bringt. Sobald jedoch der Kreis vollständig geschlossen ist, beginnt der Strom zu fliessen, und die chemischen Prozesse treten ins Leben, indem sich das Zink in der Säure auflöst und die Säure ihren Wasserstoff in Gestalt von kleinen Blasen ausscheidet. Man bemerkt jedoch, dass diese Wasserstoffblasen sich weder an der Zinkplatte, noch in der Flüssigkeit entwickeln, sondern *an der Oberfläche der Kupferplatte* (resp. der Kohlenplatte). Diese scheinbare Ueberführung des Wasserstoffgases durch die Flüssigkeit von der Oberfläche der Zinkplatte nach der Oberfläche der Kupferplatte, wo dasselbe auftritt, ist höchst bemerkenswert. Die sinnreiche Theorie, welche Grotthuss zur Erklärung dieser Erscheinung aufstellte, ist in der 37. Vorlesung: über Elektro-Chemie, auseinandergesetzt.

Diese chemischen Prozesse dauern so lange wie der Strom fliesst. Das in jedem Becher verbrauchte Zink ist der Elektrizitätsmenge proportional, welche durch den Schliessungsbogen während der Thätigkeit der Batterie hindurchströmt. Die Menge des entwickelten Wasserstoffgases ist dem verbrauchten Zink und auch der Stromstärke proportional. Nachdem die Säure auf diese Weise das Zink in sich aufgelöst hat, wirkt sie nicht mehr als ätzendes Auflösungsmittel; sie ist »getötet« worden, wie die Arbeiter sagen, denn sie ist in schwefelsaures Zink verwandelt. Die Batterie hört deshalb auf zu wirken, entweder, wenn alles Zink aufgelöst ist oder wenn die Säure erschöpft ist, d. h. wenn sie vollständig in schwefelsaures Zink verwandelt ist. Starke Zinkplatten halten lange Zeit vor, aber die Säuren müssen oft erneuert und die verbrauchte Flüssigkeit ausgegossen werden.

168. Lokale Wirkung. Ist der Schliessungsbogen nicht

vollständig, so kann der Strom nicht fliessen, und man sollte erwarten, dass ein chemischer Prozess nicht stattfände, solange die Batterie keinen Strom erzeugt. Das unreine Zink jedoch, wie solches im Handel vorkommt, bleibt in der Säure nicht unangetastet, sondern ist in steter Auflösung begriffen und scheidet beständig Wasserstoffblasen aus. Diese sogenannte **lokale Wirkung** erklärt sich auf folgende Weise: Die fremden Beimischungen im Zink bestehen aus Zusätzen von Eisen, Arsenik und andern Metallen. Gesetzt, es befände sich irgendwo an der Oberfläche ein Eisenteilchen, das mit der Säure in Berührung kommt. Dasselbe verhält sich dann wie die Kupferplatte einer Batterie gegen die Zinkteilchen in ihrer Umgebung, denn es wird dadurch eine lokale Potentialdifferenz an der Stelle, wo metallische Berührung stattfindet, erzeugt und infolge dessen auch ein lokaler Strom, welcher von den Zinkteilchen durch die Säure zu dem Eisenteilchen fliesst, und auf diese Weise findet ein stetiger Verbrauch des Zinks statt, sowohl wenn der Schliessungsbogen der Batterie geschlossen, als auch wenn er offen ist.

169. Amalgamisierung des Zinks. Wir wissen jetzt, weshalb ein Stück gewöhnliches Zink, wie es im Handel vorkommt, angegriffen wird, wenn es mit einer Säure in Berührung kommt. Infolge der metallischen Zusätze in demselben tritt an seiner ganzen Oberfläche eine lokale Wirkung ein. Um dieselbe zu beseitigen, und um das Aufzehren des Zinks zu verhüten, so lange die Batterie nicht in Thätigkeit ist, ist es gebräuchlich, die Oberfläche der Zinkplatten mit Quecksilber zu **amalgamieren.** Zu diesem Zwecke muss die zu amalgamierende Platte gereinigt werden, indem man sie in eine Säure taucht, dann giesst man ein Paar Tropfen Quecksilber auf die Oberfläche der Platte und reibt dieselben mit einem leinenen Lappen in die Platte ein. Das Quecksilber verbindet sich mit den Zinkteilchen an der Oberfläche der Platte und bildet ein breiiges Amalgam. Die Eisenteilchen lösen sich in dem Quecksilber nicht auf, sondern treten an die Oberfläche, von wo sie durch die sich bildenden Wasserstoffblasen schnell hinweggeführt wer-

den. Da sich das Zink dieses breiigen Amalgams in der Säure auflöst, so verbindet sich der Quecksilberüberzug mit neuen Zinkteilchen und bietet der Flüssigkeit auf diese Weise eine stets reine glatte Oberfläche dar.

Eine neuere, bessere Methode besteht darin, dem geschmolzenen Zink, bevor dasselbe in Platten oder Stäbe gegossen wird, ungefähr 4% Quecksilber beizumischen. Sind die Zinkplatten einer Batterie gut amalgamiert, so dürfen sich keine Wasserstoffblasen entwickeln, so lange der Schliessungsbogen offen ist. Trotzdem findet während der Thätigkeit der Batterie stets eine kleine, zerstörende, lokale Wirkung statt. Jacobi fand, dass während am + Pole sich 1 Teil Wasserstoffgas bildete, am — Pole 33,6 Teile Zink aufgelöst wurden, anstatt der 32,5 Teile, welche das chemische Aequivalent des Wasserstoffes ausmachen.

170. Polarisation. Die Wasserstoffblasen, welche an der Oberfläche der Kupferplatte frei werden, setzen sich an derselben in grosser Zahl fest und bilden an ihrer Oberfläche einen Ueberzug; daher wird in kurzer Zeit der wirksame Teil der Oberfläche der Kupferplatte bedeutend verkleinert. Wird ein einfaches Element oder eine Batterie von Elementen in Thätigkeit gesetzt, um einen Strom zu erzeugen, so stellt sich heraus, dass die Stromstärke nach wenigen Minuten, ja schon nach einigen Sekunden ganz bedeutend nachlässt und sogar fast ganz aufhört. Diese unmittelbare Abnahme der Stromstärke, die man mit einem Galvanometer und einem Paar in Säure getauchter Zink- und Kupferplatten beobachten kann, ist fast ausschliesslich die Folge des Ueberzuges von Wasserstoffblasen, welche sich an dem Kupfer-Pole festsetzen. Eine in diesem Zustande befindliche Batterie heisst **„polarisiert“**.

171. Wirkungen der Polarisation. Der Ueberzug von Wasserstoffblasen beeinträchtigt die Stromstärke des Elements in doppelter Weise:

1) Er schwächt den Strom durch den vermehrten *Widerstand*, welchen er demselben bietet, denn Gasblasen sind schlechte Leiter, und

2) er schwächt den Strom dadurch, dass er eine entgegengesetzte *elektromotorische Kraft* in's Leben ruft; denn der Wasserstoff ist ein fast ebenso leicht oxydierbarer Körper, wie Zink, besonders wenn er frisch entwickelt ist (oder in statu nascendi ist) und er ist elektropositiv, da er in der Reihe des Art. 80 oben steht. Daher erzeugt der Wasserstoff selbst eine Potentialdifferenz, welche einen Strom entsendet, welcher die entgegengesetzte Richtung des wahren Zink-Kupfer-Stromes hat. Ein Element, bei welchem infolge der Polarisation die Stromstärke schnell abnimmt, ist zur Verrichtung von Arbeit innerhalb eines geschlossenen Stromkreises nicht tauglich.

Es ist daher von grosser Wichtigkeit, diese Polarisation zu beseitigen, denn sonst würden die von Batterieen erzeugten Ströme nicht konstant sein.

172. Mittel gegen innere Polarisation. Man hat verschiedene Mittel angewendet, um die Polarisation der Elemente zu verringern oder zu verhindern. Diese Mittel sind entweder mechanischer oder chemischer oder elektrochemischer Natur.

1) *Mechanische Mittel.* Werden die Wasserstoffgasblasen einfach von der Oberfläche des + Poles abgewischt, so wird der durch sie verursachte Widerstand verringert. Wenn man mittelst einer Röhre Luft in die Säure-Lösung bläst oder die Flüssigkeit umrührt oder dieselbe durch passend angebrachte Heber in steter Bewegung hält, so wird der Widerstand ebenfalls kleiner. Ist die Oberfläche rauh oder mit Spitzen versehen, so sammeln sich die Gasblasen leichter an den Spitzen und werden schnell nach der Oberfläche geführt und so unschädlich gemacht. Dieses Mittel wurde bei dem **Smee'schen Elemente** angewendet, welches aus einer Zinkplatte und einer platinierten Silberplatte bestand, die in verdünnte Schwefelsäure tauchten; von der Silberplatte, deren Oberfläche auf diese Weise mit einem rauhen Ueberzuge von fein zerteiltem Platin bedeckt war, lösten sich die Wasserstoffgasblasen leicht ab; trotzdem nimmt der Strom einer Batterie von Smee'schen Elementen nach wenigen Minuten bedeutend ab.

2) *Chemische Mittel.* Wird der Säure ein stark oxydierender Körper beigefügt, so vernichtet derselbe die Wasserstoffgasblasen, während dieselben noch in der Entwicklung begriffen sind, und verhindert auf diese Weise sowohl den erhöhten innern Widerstand, als auch die entgegengesetzte elektromotorische Kraft. Solche Körper sind: doppelt chromsaures Kali, Salpetersäure und Chlorkalk (sogenannter Bleichkalk).

3) *Elektrochemische Mittel.* Es ist beim Gebrauch doppelter Becher, wie sie in der nächsten Vorlesung beschrieben werden, möglich, den Apparat derart einzurichten, dass ein festes Metall, z. B. *Kupfer*, an statt der Wasserstoffblasen, an der Stelle, wo der Strom die Flüssigkeit verlässt, ausgeschieden wird. Dieser elektrochemische Umsatz verhindert jegliche Polarisation.

173. Fundamentalgesetze der chemischen Wirkung im Elemente. Wir wollen diesen Abschnitt damit beschliessen, die beiden Fundamentalgesetze der chemischen Wirkung im Elemente anzugeben:

1) *Die chemische Wirkung in einem Elemente ist der Elektrizitätsmenge, welche durch dasselbe hindurchströmt, proportional,* oder mit andern Worten, ist der *Stärke* des durch dasselbe gehenden Stromes proportional.

Ein Strom von 1 Ampère, der eine Sekunde lang durch das Element fliesst, bewirkt, dass 0,00033698 g Zink in der Säure aufgelöst und 0,00010384 g Wasserstoffgas ausgeschieden werden.

2) *Die chemische Wirkung ist in jedem Elemente einer Batterie, welche aus einer Reihe von Elementen besteht, gleich gross.*

Auf das erste dieser Gesetze wurde Faraday geführt, als er Volta's Kontakttheorie zu widerlegen versuchte. Er sah voraus, dass es mit dem Prinzip von der Erhaltung der Energie nicht vereinbar wäre, dass eine blosse Kontaktkraft die Quelle eines kontinuierlichen Stromes sein sollte; daher schrieb er den Strom chemischen Wirkungen zu, welche ihm an Quantität proportional waren. Wie die Ansichten Volta's und Faraday's in Einklang gebracht werden können, wurde im letzten Abschnitt des Art. 80 angedeutet. Diese Gesetze beziehen sich

nur auf die nützliche chemische Wirkung, ohne Rücksicht auf den Verlust durch lokale Wirkungen der Nebenströme, welche eine Folge der fremdartigen Bestandteile des Metalls sind.

XV. VORLESUNG: *Volta'sche Elemente.*

174. Ein gutes Volta'sches Element sollte alle oder die meisten der folgenden Bedingungen erfüllen:

1) Seine elektromotorische Kraft muss gross und konstant sein.
2) Sein innerer Widerstand muss gering sein.
3) Es muss einen konstanten Strom liefern, und deshalb frei von Polarisation sein, ohne sich schnell abzunutzen, und ohne zu häufige Erneuerung der Säure zu erfordern.
4) Es muss vollständig ruhen, wenn der Schliessungsbogen offen ist.
5) Es muss billig und aus dauerhaftem Material sein.
6) Es muss leicht zu handhaben sein und darf keine ätzenden Dünste ausströmen.

Allen diesen Bedingungen genügt jedoch kein einziges Element, und das eine Element eignet sich besser zu diesem Zwecke, das andere zu jenem. Will man z. B. durch einen langen Draht telegraphieren, so ist ein bedeutender innerer Widerstand in der Batterie von keinem grossen Nachteil; während zur Erzeugung eines elektrischen Lichtes ein grosser innerer Widerstand durchaus vermieden werden muss. Die elektromotorische Kraft einer Batterie hängt von dem Material des Elementes und von der Anzahl der mit einander verbundenen Elemente ab, und man kann daher eine grosse E.M.K. dadurch erzielen, dass man das rechte Material wählt und eine grosse Anzahl von Elementen verbindet. Der Widerstand innerhab des Elementes lässt sich dadurch vermindern, dass man recht grosse Platten wählt, dieselben nahe aneinander stellt, so dass die Dicke der zwischen ihnen befindlichen Flüssigkeitsschicht so klein als möglich wird, und dass man gut leitende Flüssigkeiten aussucht.

175. Klassifikation der Elemente. Von den unzähligen Formen einer Batterie, welche bisher konstruiert worden sind, können nur die von hervorragender Bedeutung beschrieben werden. Man kann die Batterieen in zwei Klassen einteilen, in solche mit einer und in solche mit 2 Flüssigkeiten oder Elektrolyten. Eine bessere Einteilung ist jedoch die des Art. 172, wo man die Mittel berücksichtigt, welche eine Polarisation verhindern.

Erste Klasse: Elemente mit mechanischer Depolarisation (und einer Flüssigkeit).

Das einfache Volta'sche Element mit seinen Zink- und Kupferplatten wurde bereits beschrieben. Je grösser die Kupferplatte ist, desto länger wird die Polarisation vermieden. Cruickshank kam auf den Gedanken, die Platten aufrecht in einen Trog zu stellen, da hierdurch eine kräftigere Batterie gewonnen würde. Dr. Wollaston schlug vor, eine Kupferplatte von doppelter Grösse zu benutzen, die so umgebogen war, dass sie die Zinkplatte von beiden Seiten eng umgab, da auf diese Weise der Widerstand verringert wurde und das Wasserstoffgas sich auf eine grössere Fläche verteilte. Smee ersetzte, wie wir gesehen haben, die Kupferplatte durch platinisiertes Silber, und Walker schlug vor, an Stelle von Kupfer, resp. Silber harte Kohlenplatten zu gebrauchen, da dies billiger wäre und gleichzeitig die elektromotorische Kraft erhöhte. Die rauhe Oberfläche erleichtert das Entweichen des Wasserstoffgases. Rührt man solche Elemente um, oder hebt man ihre Kathodeplatte kurze Zeit aus der Flüssigkeit heraus, so wird ihre Kraft zum Teil wieder hergestellt.

Zweite Klasse: Elemente mit chemischer Depolarisation.

Bei diesen Elementen wendet man ausser der verdünnten Säure, (oder einem andern *Erreger*, der das Zink auflöst) noch ein stärkeres chemisches Agens als *Depolarisator* an. Als Depolarisatoren sind besonders folgende in Gebrauch: Salpetersäure, Lösungen von Chromsäure, von doppeltchromsaurem Kali oder Natron, von salpetersaurem Kali oder von Eisenchlorür; Chlor,

Brom, Braunstein, Schwefel, Bleisuperoxyd, Mennige, Kupferoxyd.

Die meisten dieser Substanzen würden jedoch bei einem Zink-Kupferelemente das Kupfer ebensowohl wie das Zink angreifen. Deshalb kann man sie nur bei einem Zink-Kohlen- oder Zink-Platin-Elemente anwenden. Salpetersäure greift auch das Zink an, wenn der Schliessungsbogen offen ist. Deshalb kann man dieselbe nicht in einem und demselben Becher mit der Zinkplatte gebrauchen. Bei dem von Poggendorf erfundenen **Chromsäure-Element** thut man doppeltchromsaures Kali zu der Schwefelsäure. Dieses Element wird höchst zweckmässig als »Flaschen-Element« eingerichtet (Fig. 93), bei welcher eine Zinkplatte die Anode ist, während ein Paar Kohlenplatten zu beiden Seiten des Zinks an ihrem obern Ende zu einer Kathode verbunden sind. Da diese Lösung auf das Zink einwirkt, auch wenn der Schliessungsbogen offen ist, so befestigt man die Zinkplatte an einem Stabe, an welchem sie aus der Flüssigkeit herausgehoben werden kann, wenn das Element nicht in Thätigkeit sein soll. Um diese Manipulation überflüssig zu machen, hat man den Depolarisator von der Flüssigkeit, in welche das Zink taucht, getrennt. Bei flüssigen Depolarisatoren geschieht dies durch Anwendung eines innern *porösen Bechers*. Solche porösen Becher aus Thon oder Pergamentpapier gestatten dem elektrischen Strome den Durchgang, während sie die Flüssigkeiten gesondert erhalten. In der einen Abteilung befindet sich das Zink in verdünnter Säure, in der andern Kohle (oder Platin) umgeben von dem Depolarisator. Bei Anwendung fester Depolarisatoren, wie Braunstein, Kupferoxyd etc. müssen dieselben die Kathode berühren. Alle festen Depolarisatoren wirken langsam.

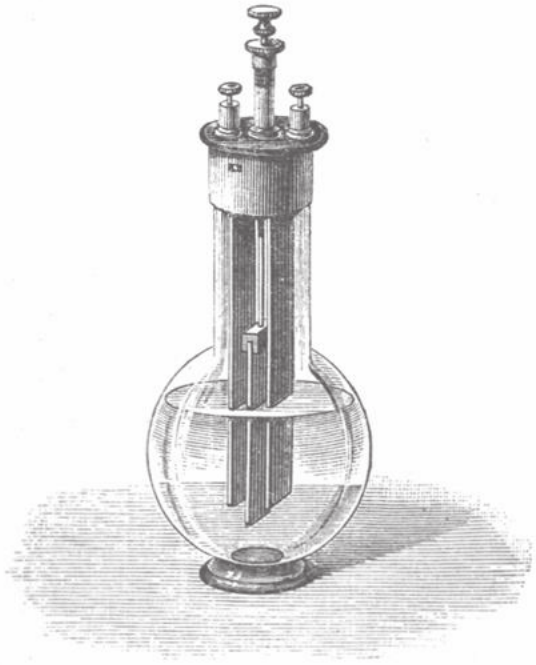


Fig. 93.

Dritte Klasse: Elemente mit elektrochemischer Depolarisation.

Wenn ein lösbares Metall in eine Lösung seines eigenen Salzes getaucht wird, z. B. Zink in schwefelsaures Zinkoxyd, oder Kupfer in schwefelsaures Kupferoxyd, so ist eine bestimmte E.M.K. zwischen ihm und seiner Lösung vorhanden, das Mass seines Bestrebens sich aufzulösen. Wird ein Strom vom Metall zur Lösung gesandt, so löst sich das Metall zum Teil auf. Wird jedoch der Strom von der Lösung zum Metall gesandt, so wird eine grössere Menge des Metalls aus der Lösung ausgeschieden. Allein so lange die chemische Beschaffenheit der Metallfläche und der Flüssigkeit unverändert ist, ist die E.M.K. an der Oberfläche konstant. Daraus folgt, dass die E.M.K. eines Elements, bei welchem jedes Metall in einer Lösung seines eigenen Salzes steht, und diese beiden Lösungen durch eine poröse Scheidewand getrennt sind, sich niemals ändert. Die Anode polarisiert nicht an der Stelle, wo sie sich in der Flüssigkeit auflöst, und die Kathode polarisiert nicht, da sie nur einen Ueberzug von ihrer eigenen Beschaffenheit erhält. Diese elektrochemische Methode zur Verhütung der Polarisation wurde von Daniell erfunden. Sie ist von wesentlicher Bedeutung nicht allein für das Daniell-, sondern auch für das Clark-Element und noch für andere. Zur Erzielung eines vollkommen konstanten Stromes sollten die beiden Salze dieselbe Säure haben, beide z. B. Schwefelsäure oder beide Chlorsäure.

176. Das Daniell'sche Element. Jedes Element der Daniell'schen Batterie besteht aus einem innern und einem äussern Becher, die durch eine poröse Scheidewand getrennt sind, damit die Flüssigkeiten der beiden Becher sich nicht mit einander vermischen. Der äussere Becher (Fig. 94) besteht gewöhnlich aus Kupfer und dient gleichzeitig als Kupferplatte. In demselben steht ein cylindrischer Becher von unglasiertem

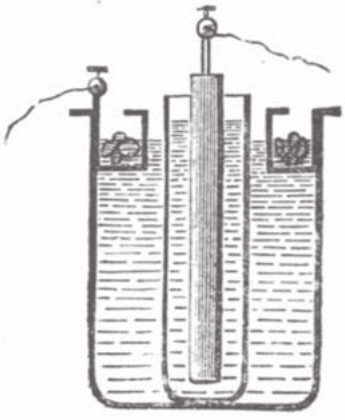


Fig. 94.

porösen Porzellan, eine sogenannte Thonzelle (ein Becher von Pergament oder auch Löschpapier thut dieselben Dienste) und hierin ein amalgierter Zinkstab als Anode. Die Flüssigkeit des innern Bechers ist verdünnte Schwefelsäure oder schwefelsaures Zinkoxyd; die des äussern ist eine gesättigte Kupfervitriollösung; ausserdem enthält ein durchlöchertes Fach am Rande des Bechers einige kleine Krystalle desselben Körpers, damit sie sich auflösen und das, was während der Thätigkeit der Batterie verbraucht wurde, ersetzen können.

Ist der Stromkreis geschlossen, so löst sich das Zink in der verdünnten Säure auf, und wird zu schwefelsaurem Zinkoxyd, während Wasserstoff frei wird. Dieses Gas erscheint jedoch *nicht* in Blasen an der Oberfläche des Kupferbechers, denn da der innere Becher porös ist, so erstrecken sich die molekularen Vorgänge (durch welche die frei gewordenen Atome des Wasserstoffes, wie Fig. 94 veranschaulichen soll, durch die Säure getrieben werden) durch die Poren des innern Bechers und dort werden in der Lösung von schwefelsaurem Kupferoxyd die Wasserstoffatome gegen Kupferatome umgetauscht, so dass sich reines Kupfer, und nicht Wasserstoff an der äussern Kupferplatte absetzt. Chemisch können diese Prozesse in 2 Stufen dargestellt werden:

$$Zn + H_2SO_4 = ZnSO_4 + H_2$$

Zink und Schwefelsäure geben schwefelsaures Zinkoxyd und Wasserstoff.

Und ferner:

$$H_2 + CuSO_4 = H_2SO_4 + Cu$$

Wasserstoff und schwefelsaures Kupferoxyd geben Schwefelsäure und Kupfer.

Der Wasserstoff ist gleichsam auf elektro-chemischem Wege während des Kreislaufs der Umbildungen in Kupfer verwandelt, und während so das Zink sich auflöst, nimmt das Kupfer zu, die verdünnte Schwefelsäure verwandelt sich allmählich in schwefelsaures Zinkoxyd, und das schwefelsaure Kupferoxyd in Schwefelsäure. Benutzt man eine Lösung von schwefelsaurem Zinkoxyd, so kommen die Wasserstoffatome nicht weiter in Betracht, indem auf chemischem Wege Kupfer für Zink umgetauscht wird.

Es findet also so lange keine Polarisation statt, wie die Kupfervitriollösung genügend gesättigt ist, und das Element ist sehr konstant, obgleich nicht durchwegs so konstant wie Clark's Normal-Element, welches in Art. 183 beschrieben ist, weil kleine Aenderungen in der elektromotorischen Kraft dadurch eintreten, dass die Zusammensetzung der zweiten Flüssigkeit sich ändert. Nimmt man Schwefelsäure, welche mit 12 Teilen Wasser verdünnt ist, so beträgt die E.M.K. 1,178 Volt, dagegen 1,07 Volt, wenn man konzentriertes schwefelsaures Zinkoxyd anwendet; 1,1 Volt bei einer halbkonzentrierten Lösung von schwefelsaurem Zinkoxyd und 1,1 Volt oder noch weniger bei den gewöhnlichen Elementen, die mit Wasser oder verdünnter Säure gefüllt sind. Infolge ihrer Beständigkeit hat diese Batterie, in einer geeigneten flachen Form aufgebaut (Fig. 98), vielfache Anwendung in der Telegraphie gefunden.

177. Das Grove'sche Element. Wilhelm Grove erfand ein Element, welches sich durch grössere E.M.K. sowohl, als auch durch kleinern innern Widerstand vor dem Daniell'schen Elemente auszeichnet. Bei dem Grove'schen Elemente hat man einen äussern Becher von glasiertem Porzellan oder *Ebonit,* welcher eine amalgamierte Zinkplatte und verdünnte Schwefelsäure enthält. In dem innern porösen Becher dient als negativer Pol ein Stück Platinblech, welches in konzentrierte Salpetersäure taucht. Bei diesem Elemente findet keine Polarisation statt, denn der Wasserstoff, welcher durch die Auflösung des Zinks in verdünnter Schwefelsäure frei wird, zersetzt bei seinem Durchgange durch die Salpetersäure, um nach dem Platinpole zu gelangen, die Salpetersäure und wird selbst oxydiert, so dass Wasser und die roten Dämpfe der Untersalpetersäure entstehen. Dieses Gas ruft jedoch keine Polarisation hervor, denn da dasselbe in Salpetersäure sehr leicht löslich ist, so bildet es weder einen Ueberzug auf der Platinplatte, noch erregt es, wie der Wasserstoff, eine entgegengesetzte elektromotorische Kraft mit dem Zink. Den Grove'schen Elementen kann man eine flache Form geben, indem man das Zink so

umbiegt, dass es den platten, porösen Becher auf beiden Seiten umgiebt. Dadurch wird der innere Widerstand, der ohnehin schon wegen der guten Leitungskraft der Salpetersäure gering ist, noch kleiner. Deshalb liefert das Grove'sche Element 3 bis 4 Stunden lang einen kräftigen, gleichmässigen Strom. Die E.M.K. eines Elementes, beträgt circa 1,9 Volt. Ein einzelnes Element bringt einen 2 bis 3 Zoll langen, dünnen Platindraht sofort zum Rotglühen, oder treibt eine kleine elektro-magnetische Maschine. Um grössere Wirkungen zu erzielen, muss man eine Anzahl von Elementen zu einer »Kette« verbinden, indem man das Platin eines Elementes mit dem Zink des nächst folgenden verbindet. 50 solcher Elemente, von denen jedes ungefähr $\frac{1}{4}$ Liter Flüssigkeit enthält, genügen vollständig, um ein elektrisches Licht zu erzeugen, wie in der 39. Vorlesung auseinandergesetzt werden wird.

178. Das Bunsen'sche Element. Das nach Bunsen benannte Element ist eine Modifikation des Grove'schen, und wurde auch ursprünglich von Grove vorgeschlagen. In dem Bunsen'schen Elemente ist das kostspielige[1]) Platinblech durch einen Stab oder eine Platte aus harter Kohle ersetzt. Eine cylindrische Form des Elements zeigt Fig. 95. Die Potentialdifferenz für eine Zink-Kohlen-Kombination ist etwas grösser, als für eine solche von Zink-Platin, was von Vorteil ist; aber das Bunsen'sche Element ist schwer in Ordnung zu halten; auch ist es schwierig, eine gute Berührung zwischen der rauhen Oberfläche der Kohle und dem Kupferbügel herzustellen, welcher die Kohle des einen Elements mit dem Zink des nächstfolgenden verbindet. Das obere Ende der Kohle

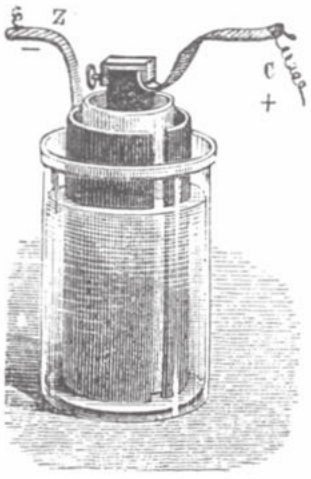


Fig. 95.

1) Ein Gramm Platin kostet mehr als eine Mark, nahe halb so viel wie Gold; während man einen Zentner Gaskohle für eine Kleinigkeit bekommt, oft für die blosse Mühe, sie aus den Gasretorten loszuhauen.

wird bisweilen, damit die Säure nicht aufsteigt, mit Paraffinwachs getränkt und mit Kupfer galvanotypiert. Fig. 96 veranschaulicht die gewöhnliche Art, eine Kette von fünf solchen

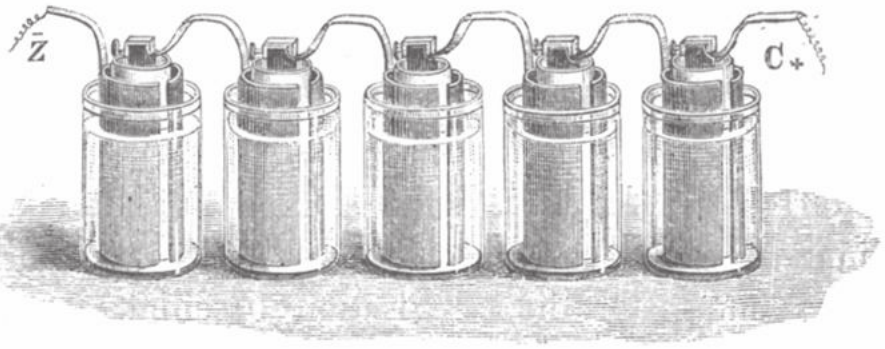


Fig. 96.

Elementen zusammenzustellen. Die Bunsen'sche Batterie liefert für längere Zeit einen kontinuierlichen Strom als die niedrigen Grove'schen Elemente, wegen der grösseren Quantität Säure, welche die cylindrischen Becher enthalten [1]). Bei diesen Elementen gebraucht man häufig statt der Salpetersäure Chromlösungen, indem man einer Lösung aus doppeltchromsaurem Kali oder Natron noch starke Schwefelsäure hinzufügt. Lösliche Depolarisatoren in Gestalt von Chrompulvern werden in der Weise hergestellt, dass man starke Schwefelsäure erhitzt und dann allmählig gepulvertes doppeltchromsaures Natron einrührt. Die teigige Masse lässt man hierauf abkühlen und pulverisiert dieselbe.

179. Leclanché's Element. Um elektrische Klingelzüge und Telephone in Betrieb zu setzen, und teilweise auch zum Telegraphieren gebraucht man ein von Leclanché erfundenes Zink-Kohle-Element, bei welchem die erregende Flüssigkeit nicht verdünnte Säure, sondern eine Salmiaklösung ist. In dieser löst sich das Zink auf und bildet Chlorzinkammonium, während Ammoniakgas und Wasserstoffgas am Kohlen-Pole frei werden.

---

1) Callan konstruierte eine grosse Batterie, in welcher Gusseisen als + Pol in starker Salpetersäure stand, während die Zinkplatten in verdünnte Schwefelsäure getaucht waren. Das Eisen wird unter diesen Umständen von der Säure nicht angegriffen, sondern befindet sich in einem sogenannten »passiven Zustande«. Seine Oberfläche scheint alsdann mit einer Schicht von magnetischem Superoxyd oder Sauerstoff überzogen zu sein.

Der Depolarisator ist schwarzes Mangansuperoxyd, welches in Verbindung mit gepulverter Kohle die Kathode umgiebt. Man thut dasselbe entweder in einen porösen Becher oder fügt sie als zusammengeballtes Stück bei. Das Mangansuperoxyd scheidet den Sauerstoff allmählich aus. Benutzt man das Element zur Erzeugung eines kontinuierlichen Stromes auf längere Zeit, so nimmt die Kraft des Elements infolge der Ansammlung der Wasserstoffblasen ab; überlässt man dann dasselbe sich selbst, so gewinnt es wieder seine frühere Stärke, indem das Hyperoxyd nach und nach die Polarisation beseitigt. Da das Element in anderer Beziehung völlig konstant ist, und Monate oder Jahre lang nicht erneuert zu werden braucht, so eignet sich dasselbe vorzüglich zu häuslichen Zwecken. Es hat den Vorteil, dass es keine ätzenden Säuren enthält. Von diesem Elemente sind viele Millionen in Gebrauch, besonders da, wo der Strom nur kurze Zeit fliesst, und der Schliessungsbogen für gewöhnlich offen bleibt. Fig 97 zeigt 3 zu einer Kette verbundene Elemente

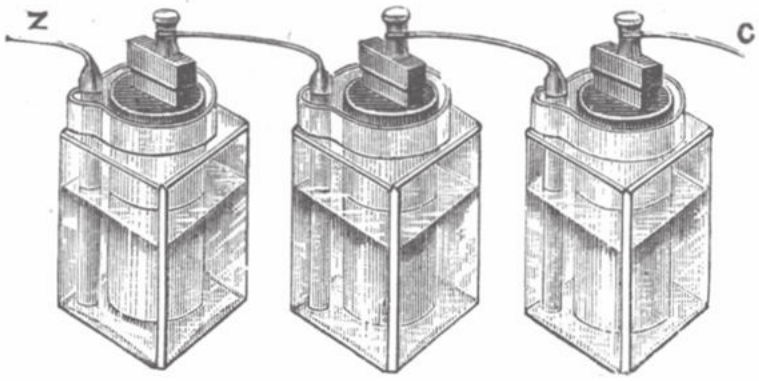


Fig. 97.

von Leclanché. Walker benutzte Schwefel statt des Manganoxyds. Niaudet verwendete als Depolarisator sog. Bleichkalk, welcher reichliche Mengen von Chlor und Sauerstoff enthält. Auch lässt sich statt des Salmiaks gewöhnliches Salz verwerten. Eine Modifikation des Leclanché'schen Elements sind die transportabelen Elemente, bei denen der Erreger nicht verschüttet werden kann. Der innere Raum des Elements wird mit einer schwammigen Masse oder auch mit Pariser Pflaster angefüllt, in

dessen Poren die Salmiaklösung sitzen bleibt. Diese Elemente sind als *Trocken-Elemente* bekannt.

180. Das Lalande'sche Element. Dieses Element gehört der zweiten Klasse an. Es hat als Depolarisator Kupferoxyd, welches mit einer Kathode aus Kupfer oder Eisen mechanisch verbunden ist. Die Anode ist Zink und die erregende Flüssigkeit eine 30prozentige Lösung von Aetzkali, in welcher das Zink sich auflöst, Zinkkali bildend, während das metallische Kupfer in einen körnigen Zustand an der Kathode übergeht. Das Element hat nur 0,8 bis 0,9 Volt E.M.K., liefert aber einen grossen und konstanten Strom.

181. De la Rue's Batterie. De la Rue hat ein vollkommen konstantes zur 3. Klasse gehöriges Element konstruiert, bei welchem die beiden Metalle Zink und Silber sind. Das Zink taucht in Zinkchlorür, und das Silber ist von geschmolzenem Silberchlorür umgeben. In dem Masse wie das Zink sich auflöst, sammelt sich metallisches Silber an der Kathode, gerade wie Kupfer im Daniell'schen Elemente. De la Rue konstruierte eine kollossale Batterie von mehr als 11,000 kleinen Elementen. Die Potentialdifferenz zwischen der ersten Zinkplatte und der letzten Silberplatte dieser ungeheuern Batterie betrug über 11,000 Volt, und doch sprang vom + Pole zum negativen erst in einer Entfernung von weniger als 0,5 cm ein Funke über. Bei 8040 Elementen betrug die Funkenlänge nur 0,2 cm.

182. Gravitationselemente. Statt einen porösen Becher zu gebrauchen, um die beiden Flüssigkeiten auseinander zu halten, ist es in dem Falle, wo die eine Flüssigkeit schwerer ist, als die andere, auch möglich, den Apparat so einzurichten, dass die schwerere Flüssigkeit die untere Schicht des Bechers bildet und die leichtere auf derselben schwimmt. Solche Apparate heissen *Gravitationselemente;* doch ist die Trennung niemals vollkommen, da die schwere Flüssigkeit infolge der Diffusion allmählich nach oben steigt. Die Anordnung des Daniell'schen Elementes als Gravitationselement rührt von Meidinger, Minotto, Callaud und Kelvin her. Von Siemens wurde das Daniell'sche

Element so abgeändert, dass die beiden Flüssigkeiten durch Gazezeug getrennt wurden. Die »Sägemehl-Batterie« von Kelvin ist eine Daniell'sche Batterie, bei welcher die Becher mit Sägemehl gefüllt sind, um dieselben vor Zerstörung zu schützen und sie bequem transportieren zu können.

183. Clark's Normal-Element. Ein Normal-Element, dessen E.M.K. noch konstanter ist, als diejenige des Daniell'schen, wurde von Latimer Clark erfunden. Dieses Element, welches heutzutage als internationales Normalelement angesehen wird, hat eine Anode aus reinem Zink in einer konzentrierten Lösung von schwefelsaurem Zinkoxyd, während die Kathode reines Quecksilber ist, auf welchem eine Masse von schwefelsaurem Quecksilberoxyd schwimmt. Fig. 98 zeigt die Aufstellung

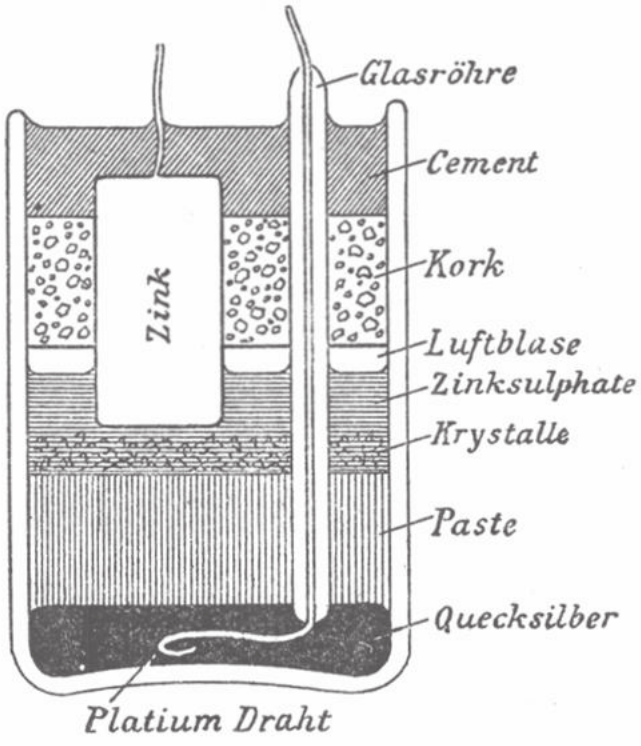


Fig. 98.

eines Clark'schen Elements in natürlicher Grösse. Seine E.M.K. beträgt 1,434 Volt bei 15° C.

Weston benutzt eine Anode von Kadmium, welches in schwefelsaures Kadmium eintaucht. Die E.M.K. des so modifizierten Elements beträgt nach ihm bei gewöhnlicher Temperatur 1,025 Volt.

v. Helmholtz benutzte Quecksilberchlorür und Zinkchlorür, anstatt der Sulphate. Nach Carhart ändert sich je nach der Verdünnung des Zinkchlorürs die E.M.K. dieses Elements.

184. Die folgende Tabelle giebt die elektromotorischen Kräfte der aufgezählten Elemente an;

Name des Elements.	Anode	Erreger	Depolarisator	Kathode	Anzahl der Volt.
1. Klasse.		Lösung von			
Valta (Wollaston etc.)	Zink	H_2SO_4	fehlt	Kupfer	1,0 bis 0,5
Smee	Zink	H_2SO_4	fehlt	Platinisiertes Silber	1,0 bis 0,5
Law	Zink	H_2SO_4	fehlt	Kohle	1,0 bis 0,5
2. Klasse.					
Poggendorff (Grenet, Fuller etc.)	Zink	H_2SO_4	$K_2Cr_2O_7$	Kohle	2,1
Grove	Zink	H_2SO_4	HNO_3	Platin	1,9
Bunsen	Zink	H_2SO_4	HNO_3	Kohle	1,9
Leclanché	Zink	NH_4Cl	MnO_2	Kohle	1,4
Lalande	Zink	KHO	CuO	Kohle	0,8
Upward	Zink	$ZnCl_2$	Cl	Kohle	2,0
Fitch	Zink	NH_4Cl	$KClO_3 + NaClO_3$	Kohle	1,1
Papst	Eisen	Fe_2Cl_6	Fe_2Cl_6	Kohle	0,4
Obach (trocken)	Zink	NH_4Cl in $CaSO_4$	MnO_2	Kohle	1,46
3. Klasse.					
Daniell (Meidinger, Minotto etc.)	Zink	$ZnSO_4$	$CuSO_4$	Kupfer	1,07
De la Rue	Zink	$ZnCl_2$	AgCl	Silber	1,42
Marié Davy	Zink	$ZnSO_4$	Hg_2SO_4	Kohle	1,4
Clark (Normal)	Zink	$ZnSO_4$	Hg_2SO_4	Quecksilber	1,434
Weston	Kadmium	$CdSO_4$	Hg_2SO_4	Quecksilber	1,025
v. Helmholtz	Zink	$ZnCl_2$	Hg_2Cl_2	Quecksilber	1,0
4. Klasse.					
Akkumulatoren (Planté, Faure etc.	Blei	H_2SO_2	PbO_2	Blei	2,1 bis 1,85

185. Stromstärke. Der Leser darf die Ziffern der obigen Tabelle nicht mit der Stärke des Stromes verwechseln, welchen die verschiedenen Elemente liefern; der Strom hängt, wie in der 13. Vorlesung bemerkt wurde, sowohl von dem innern *Widerstande* der Elemente und von dem Widerstande ihres Schliessungsbogens, als auch von ihrer E.M.K. ab. Die E.M.K. eines Elementes ist von der Grösse desselben unabhängig und wird nur durch die gewählten Substanzen und die Beschaffenheit derselben bestimmt. Der Widerstand hängt von der Grösse des Elements ab, von der Leitungsfähigkeit der Flüssigkeit, von der Dicke der Flüssigkeitsschicht, welche der Strom durchdringen muss u. s. w.

Die exakte Definition für die **Stromstärke** ist die folgende: *Die Stromstärke ist diejenige Elektrizitätsmenge, welche in einer Sekunde durch einen Querschnitt des Schliessungsbogens hindurchfliesst* [1]).

Nehmen wir an, dass während 10 Sekunden 25 *Coulomb* Elektrizität durch einen Schliessungsbogen fliessen, so beträgt die Durchschnittsstärke jenes Stromes innerhalb jener Zeit $2\frac{1}{2}$ *Coulomb* pro Sekunde, oder $2\frac{1}{2}$ *Ampère.* Die gewöhnliche Stromstärke beim Telegraphieren auf weite Strecken beträgt nur 0,005 bis 0,01 *Ampère.*

Wenn in t Sekunden die Elektrizitätsmenge Q durch den Schliessungsbogen fliesst, so findet man die Stromstärke C für jene Zeit nach der Formel:

---

1) Die Ausdrücke »stark, gross und intensiv«, welche in Bezug auf Ströme gebraucht werden, bezeichnen genau dasselbe. In frühern Zeiten, als das Ohm'sche Gesetz noch nicht richtig erkannt war, pflegten die Elektriker von »Massenströmen« und »Intensitätsströmen« zu sprechen; mit dem erstern Ausdruck bezeichneten sie einen Strom, der durch einen Schliessungsbogen floss, dessen Widerstand sowohl innerhalb, wie ausserhalb der Batterie sehr gering war; und mit dem letztern Ausdrucke bezeichneten sie einen Strom, der von einer grossen elektromotorischen Kraft erzeugt wurde. Die Ausdrücke waren bequem, sollten jedoch vermieden werden, da sie zu Missverständnissen führen.

$$C = \frac{Q}{t}.$$

(vergl. Art. 157).

Die Gesetze, welche die Stromstärke in einem Stromkreise bestimmen, wurden zuerst von Dr. G. S. Ohm angegeben, welcher sie im folgenden Gesetze zusammenfasste:

186. Das Ohm'sche Gesetz. *Die Stromstärke ist der elektromotorischen Kraft direkt und dem Widerstande des Stromkreises umgekehrt proportional*, oder mit andern Worten, alles, was die E.M.K. des Elements vergrössert, erhöht die Stromstärke, während alles, was den Widerstand erhöht (entweder den innern Widerstand in den Elementen selbst oder den Widerstand der äussern Drähte des Schliessungsbogens), die Stromstärke verringert. Dies lässt sich durch folgende Formel ausdrücken:

$$\frac{E}{W} = J$$

wo E die Anzahl der Volt, W die Anzahl der Ohm des Schliessungsbogens und J die Anzahl der Ampère bedeutet.

Beispiel: Einen Strom zu bestimmen, der bei einer E.M.K. von 20 Volt und bei einem Widerstande von 5 Ohm fliesst.

$$20 : 5 = 4 \text{ Ampère.}$$

(Genaueres über das Ohm'sche Gesetz findet sich in der 33. Vorlesung).

Das Ohm'sche Gesetz sagt nichts über die Energie des Stromes. Diese ist sowohl dem Strome als auch der ihn treibenden E.M.K. proportional (vergl. Art. 430).

187. Widerstand und Aufstellung der Elemente. Die innern Widerstände der aufgezählten Elemente sind nun sehr von einander verschieden und richten sich ausserdem nach der Grösse derselben. Im allgemeinen können wir sagen, dass der Widerstand eines Daniell'schen Elementes ungefähr das 5fache desjenigen eines Grove'schen Elementes von gleicher Grösse beträgt. Das Grove'sche Element besitzt also sowohl eine grössere E.M.K. als auch einen geringern innern Widerstand. Dasselbe liefert in der That bei einem kurzen dicken

Drahte einen circa 8mal stärkern Strom als ein Daniell'sches Element von gleicher Grösse.

Wir können demnach die Stärke einer Batterie auf doppelte Weise vergrössern:

1) indem wir ihre E.M.K. erhöhen,

2) indem wir ihren innern Widerstand verringern.

Da die elektromotorische Kraft eines Elementes durch das dazu verwandte Material bestimmt wird, so ist das einzige Mittel, die gesamte E.M.K. einer Batterie aus gegebenem Material zu erhöhen, dies, dass man die Anzahl der zu einer Kette vereinigten Elemente vergrössert. Im Telegraphendienst ist es üblich, 2 bis 300 der niedrigen Daniell'schen Elemente auf diese Weise zusammen zu ketten; und sie werden gewöhnlich in trog-

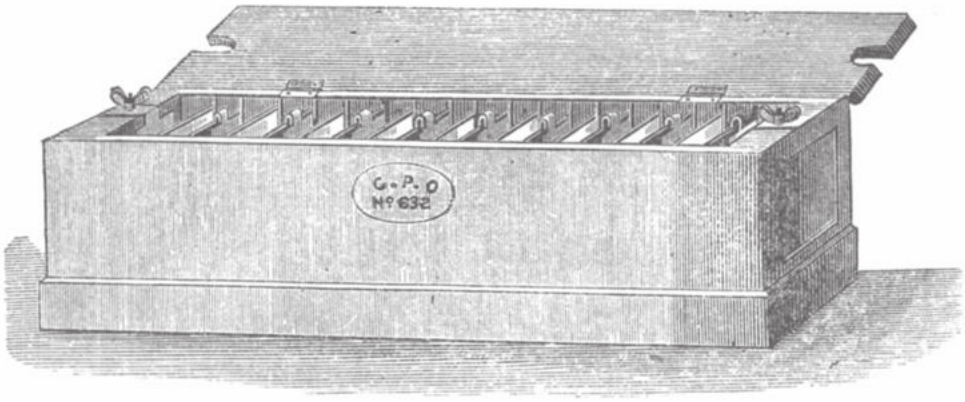


Fig. 99.

ähnlichen Kasten aufgestellt, welche eine Reihe von 10 Elementen enthalten, wie Fig. 99 zeigt.

Um den innern Widerstand eines Elementes zu verringern, kann man folgende Mittel anwenden:

1) Man kann die Platten näher zusammenstellen, so dass der Strom eine weniger dicke Flüssigkeitsschicht zu durchsetzen hat.

2) Man kann grössere Platten nehmen, da dem Strome dann gewissermassen mehr Wege durch die Flüssigkeitsschicht geboten sind.

3) Man kann die Zinkplatten mehrerer Elemente mit einander verbinden, so dass sie gleichsam eine grosse Zinkplatte bilden, und ebenso die Kupferplatten. Auf diese Weise ver-

bundene Elemente nennt man »parallel geschaltet«, oder »auf Quantität« verbundene Elemente, zum Unterschiede von der Anordnung der Elemente in einfachen Reihen. Nehmen wir z. B. an, dass vier gleiche Elemente auf diese Weise verbunden sind, so hat der Strom eine 4mal so grosse Anzahl von möglichen Wegen, auf denen er durch die Flüssigkeit vom Zink zum Kupfer gelangen kann; daher ist dann der innere Widerstand des ganzen Apparates nur der vierte Teil von dem eines einzelnen Elementes. Aber die E.M.K. der 4 Elemente ist dann nicht grösser, als diejenige eines einzigen Elementes.

Es ist höchst wichtig zu beachten, dass die Stromstärke auch durch die Widerstände der Drähte des äussern Schliessungsbogens beeinflusst wird; und wenn der äussere Widerstand ohnehin schon gross ist, wie z. B. beim Telegraphieren auf grosse Entfernungen, so nützt es wenig, den innern Widerstand zu verringern, da derselbe bereits bedeutend geringer ist, als der Widerstand der Drahtlinie. Es ist im Gegenteil vorteilhaft, die Anzahl der Elemente der Kette zu erhöhen, obgleich jedes Element den gesamten innern Widerstand etwas vermehrt.

Beispiel: Hat die Drahtlinie einen Widerstand von 1000 Ohm, und benutzt man 5 Elemente, jedes mit einer E.M.K. von 1,1 Volt und einem innern Widerstande von 3 Ohm, so beträgt der Strom nach dem Ohm'schen Gesetze: 5,5 : 1015 = 0,0054 Ampère. Benutzt man aber 8 Elemente, so wird dadurch allerdings der gesamte Widerstand auf 1040 Ohm erhöht, dagegen steigt die E.M.K. auf 8,8 Volt, und der Strom auf 0,0085 Ampère.

Die E.M.K. der nur eine Flüssigkeit enthaltenden Elemente von Volta und Smee ist als unzuverlässig zu bezeichnen, denn die entgegengesetzt gerichtete E.M.K. der Polarisation tritt so schnell auf, dass die wahre E.M.K. des Elements kaum gemessen werden kann. Die verschiedenen Werte, welche andern Elementen beigelegt werden, finden ihre Erklärung in den verschiedenen Graden der Konzentration der Flüssigkeiten. So wird z. B. bei den zur Telegraphie benutzten Daniell'schen Elementen anfangs bloss Wasser in die die Zinkplatten enthalten-

den Becher gegossen; und ihre E.M.K. ist geringer, als in dem Falle, wo man dem Wasser eine Säure oder schwefelsaures Zink beimischt.

188. Andere Batterieen. Von verschiedenen Physikern sind eine Menge anderer Formen galvanischer Elemente erfunden worden. Unter ihnen finden sich 2 von nur theoretischem Interesse, bei denen man nicht zwei verschiedene Metalle benutzt, welche von derselben Flüssigkeit ungleich erregt werden, sondern zwei Flüssigkeiten, welche auf das Metall einen verschiedenen chemischen Einfluss ausüben. Hier findet keine Berührung verschiedener Metalle statt. Die erste dieser Batterieen erfand der Kaiser Napoleon III. Beide Platten waren von Kupfer und tauchten in Lösungen von verdünnter Schwefelsäure, resp. von Natronlauge, welche durch eine poröse Scheidewand von einander getrennt waren. Die zweite Batterie rührt von Wöhler her; dieselbe besteht nur aus 2 Aluminium-Platten, welche in starke Salpetersäure, resp. Natronlauge tauchen. Upward brachte eine Chlorbatterie in Vorschlag, bestehend aus Zinkstreifen, welche in Zinkchlorür tauchen, und aus Kohlekathoden, welche von zerstossener Kohle in einem porösen Becher umgeben sind. In die Elemente wird Chlorgas gepumpt, welches von den Flüssigkeiten aufgenommen wird und so als Depolarisator wirkt. Die E.M.K. des Elements beträgt 2 Volt.

Bennet hat jüngst eine wohlfeile und höchst wirksame Batterie beschrieben, bei welcher Eisen und Zink als Metalle, und eine starke Natronlauge als erregende Flüssigkeit Verwendung finden. Alte, mit Eisenfeilspänen gefüllte Fleischbüchsen eignen sich gut als positiver Pol und können die Lösung enthalten. Kleine Zinkstücke, welche in Quecksilber tauchen, das sich in einem innern, niedrigen Porzellanbecher befindet, bilden den negativen Pol. Marié Davy benutzte ein Element, bei dem das Zink in schwefelsaures Zinkoxyd taucht, während die Kohleplatte in einer breiigen Lösung von schwefelsaurem Quecksilberoxyd steht. Ist das Element in Thätigkeit, so sammelt sich an der Oberfläche der Kohle Quecksilber an, so dass das Element thatsächlich ein Zink-Quecksilber Element ist. Dasselbe fand

in Frankreich vor Einführung des Leclanché'schen Elements vielfache Anwendung beim Telegraphieren. Obach's Trockenelement hat einen äussern als Becher dienenden Zinkcylinder, der mit Pariser Pflaster, das in Salmiak getränkt ist, überzogen ist, und eine innere Kohlekathode, die von Mangansuperoxyd umgeben ist, das mit Graphit vermengt ist.

Das in den Vereinigten Staaten gebräuchliche Fitch Element ist ein Zink-Kohle Element, dessen Erreger eine Salmiaklösung ist, welcher chlorsaures Kali und chlorsaures Natron beigemengt ist.

Pabst benutzte ein Eisen-Kohle Element, dessen Erreger eine Lösung von Eisenchlorür ist. Das Eisen löst sich auf und es bildet sich anfangs Chlor, doch ohne Polarisation, indem die Flüssigkeit sich durch Absorption der in der Luft befindlichen Feuchtigkeit von selbst regeneriert. Das Element ist sehr konstant, hat aber eine geringe E.M.K.

Jablochkoff hat eine Batterie beschrieben, bei welcher Platten aus Kohle und Eisen in geschmolzenem Salpeter stehen. Die Kohle ist hier das elektropositive Element, indem dieselbe in der Flüssigkeit schnell verbraucht wird.

Die Beschreibung der *Sekundär-Batterieen* von Planté und Faure und der Grove'schen *Gasbatterie* findet sich Art. 487 und 488.

Beachtung verdient noch die sogenannte *trockene Säule* von Zamboni. Dieselbe besteht aus einer Anzahl von Papierscheiben, welche auf der einen Seite mit Zinkfolie und auf der andern mit Mangansuperoxyd belegt sind. Mehrere 1000 dieser Scheiben sind innerhalb einer Glasröhre über einander geschichtet. Ihr innerer Widerstand ist sehr bedeutend, da der innere Leiter die Feuchtigkeit des Papiers, und diese gering ist; dagegen ist ihre elektromotorische Kraft sehr gross, und eine gute trockene Säule liefert Funken. Es vergehen viele Jahre, ehe das Zink vollständig oxydiert oder das Mangan verbraucht ist. Im Clarendon-Laboratorium zu Oxford befindet sich eine trockene Säule, deren Pole 2 Metallglocken sind; zwischen ihnen hängt eine kleine Messingkugel, welche durch Hin- und Herschwingen

die Elektrizität langsam entladet. Die Glocken läuten fortwährend schon seit mehr als 50 Jahren.

189. Einfluss der Wärme auf Elemente. Wird ein Element erwärmt, so liefert es einen stärkern Strom als bisher. Dies rührt hauptsächlich von dem Umstande her, dass die Flüssigkeiten, wenn sie erwärmt werden, besser leiten, so dass der innere Widerstand des Elementes dadurch geringer wird. Auch bemerkt man beim Erhitzen eine geringe Aenderung in der E.M.K. So steigt z. B. die E.M.K. eines Daniell'schen Elementes um circa $1\frac{1}{2}\%$, wenn dasselbe auf die Temperatur des siedenden Wassers erhitzt wird, während diejenige einer Bichromat-Batterie unter gleichen Umständen um 2% abnimmt. Bei dem Clark'schen Normalelement nimmt die E.M.K. etwas bei steigender Temperatur ab. Seine E.M.K. bei der Temperatur θ lässt sich nach der Formel berechnen:

$$\text{E.M.K.} = 1{,}434\ [1 - 0{,}00077\ (\theta - 15)]\ \text{Volt.}$$

XVI. VORLESUNG: *Magnetische Wirkungen des Stromes.*

190. Oersted's Entdeckung. Einen Zusammenhang irgend welcher Art zwischen Magnetismus und Elektrizität hatte man schon längst vermutet. So hatte man beobachtet, dass der Blitz Messer und andere Gegenstände aus Stahl magnetisiert; doch waren fast alle Versuche, diese Wirkungen durch kräftige elektrische Ladungen oder dadurch hervorzubringen, dass man elektrische Ströme durch Stahlstäbe schickte, fehlgeschlagen [1]). Um das Jahr 1802 entdeckte Romagnosi in Trient, dass eine Volta'sche Säule einen Einfluss auf die Magnetnadel ausübt. Der wahre Zusammenhang zwischen Magnetismus und Elektrizität blieb unentdeckt.

---

1) Bis zu dieser Stelle der Vorlesungen ist von keinem Zusammenhange zwischen Elektrizität und Magnetismus die Rede gewesen, obgleich wir uns schon mit jener wie mit diesem beschäftigt haben. Derjenige Leser, welcher sich nicht daran erinnert, ob eine elektrische Ladung einen Magnet affiziert oder nicht, möge das in Art. 99 Gesagte wieder durchlesen.

Im Jahr 1819 zeigte Oersted aus Kopenhagen, dass ein Magnet sich rechtwinklig zu einem Drahte zu stellen strebt, durch welchen ein elektrischer Strom geführt wird. Er fand auch, dass die Richtung, nach welcher sich die Nadel aus ihrer gewöhnlichen Lage wendet, ob nach der rechten oder linken Seite, von der Lage des den Strom führenden Drahtes abhängt — ob sich derselbe oberhalb oder unterhalb der Nadel befindet — und von der Richtung, in welcher der Strom durch den Draht fliesst.

191. Oersted's Versuch. Es genügt ein sehr einfacher Apparat, um den Fundamentalversuch zu wiederholen. Man lasse eine Magnetnadel auf einer Spitze balancieren (Fig. 100)

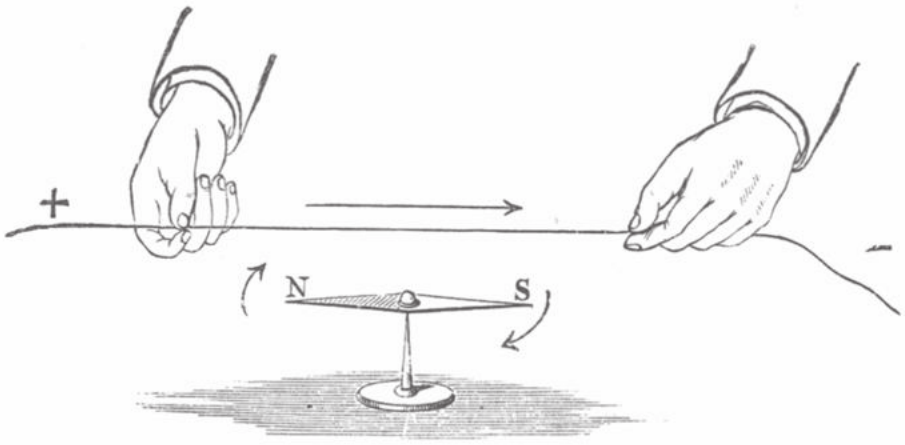


Fig. 100.

und halte über dieselbe und parallel zu ihr einen starken Kupferdraht, dessen eines Ende mit dem einen Pole einer Batterie von 1 bis 2 Elementen in Verbindung steht. Mit dem andern Ende des Drahtes berühre man alsdann den andern Pol der Batterie. Sobald der Schliessungsbogen vollständig ist, fliesst ein Strom durch den Draht und die Nadel wird sogleich aus ihrer Lage abgelenkt. Fliesst der Strom durch den Draht *oberhalb* der Nadel in der Richtung von Norden nach Süden, so wird der nordsuchende Pol der Nadel nach Osten abgelenkt; fliesst der Strom in dem Drahte von Süden nach Norden, so wird derselbe Pol der Nadel nach Westen abgelenkt. Wird jedoch der Draht *unter* die Nadel gehalten, so sind die Ab-

lenkungen umgekehrt, d. h. durch einen von Norden nach Süden fliessenden Strom wird der nordsuchende Pol nach Westen abgelenkt.

192. Ampère's Regel. Um diese Ablenkungen dem Gedächtnisse einzuprägen, hat Ampère folgende seltsame, aber sehr brauchbare Regel aufgestellt: *Man nehme an, dass ein Mensch in dem Drahte mit dem Strome schwimmt, und dass er sein Gesicht der Nadel zukehrt, so wird der nordsuchende Pol der Nadel nach* links *abgelenkt.* Mit andern Worten: Die Ablenkung des nordsuchenden Pols einer Magnetnadel, welche von dem Leiter aus betrachtet wird, ist nach der linken Seite des Stromes gerichtet.

Für gewisse besondere Fälle, wo ein *fester* Magnetpol auf einen *beweglichen* Strom wirkt, ist folgende *Umkehrung der Ampère'schen Regel* sehr bequem. Man nehme an, dass ein Mensch in dem Drahte mit dem Strome schwimmt, und dass er längs der Richtung der Kraftlinien des Magnetpols blickt (d. h. wie die Kraftlinien verlaufen, vom Pole weg, wenn es der nordsuchende, zum Pole hin, wenn es der südsuchende ist), dann wird er und mit ihm der leitende Draht nach *links* abgelenkt.

193. Korkzieher-Regel. Zweckmässiger ist folgende von Maxwell angegebene Regel. *Die Richtung des Stromes und die der resultierenden magnetischen Kraft verhalten sich ebenso, wie die Umdrehung und die fortschreitende Bewegung eines gewöhnlichen* (rechts gewundenen) *Korkziehers.* In Fig. 101 möge der Kreis die Stromrichtung darstellen, dann giebt der Pfeil die Richtung der resultierenden magnetischen Kraft an. Der Vorteil dieser Regel besteht darin, dass sie im umgekehrten Falle ebenfalls anwendbar ist. Wenn der Pfeil die Richtung des Stromes in einem geradlinigen Drahte angiebt, so giebt der Kreis die Richtung der resultierenden magnetischen Kraft um denselben herum an.

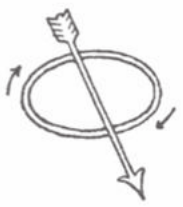


Fig. 101.

194. Galvanoskop. Wenn ein Strom *unterhalb* der Nadel in der einen Richtung und dann *oberhalb* derselben in entgegen-

gesetzter Richtung geführt wird, indem man den Draht umbiegt (Fig. 102), so ergiebt eine einfache Ueberlegung, dass die Kräfte, welche die beiden Teile des Stromes auf die Nadel ausüben, dieselbe Richtung haben. Denn ist *a* der nordsuchende und *b* der südsuchende Pol der schwebenden Nadel, so ist der Strom in dem untern Teile des Drahtes bestrebt, die Nadel so zu drehen, dass sich *a* dem Beobachter nähert, während *b* zurückgeht; und der oberhalb fliessende Strom, welcher ebenfalls den nordsuchenden Pol nach links ablenkt, strebt in gleicher Weise *a* nach dem Beobachter zu treiben, und *b* von ihm weg. Die Nadel stellt sich nicht genau rechtwinklig zu der Richtung des leitenden Drahtes, sondern bleibt in schiefer Lage stehen. Die richtenden Kräfte des Erdmagnetismus streben die Nadel so zu stellen, dass sie von Norden nach Süden zeigt. Der elektrische Strom strebt dagegen der Nadel die Richtung von Osten nach Westen zu geben. Die Richtung der Resultierenden liegt zwischen diesen Richtungen und hängt von der relativen Stärke der beiden wirkenden Kräfte ab. Ist der Strom sehr stark, so wird die Nadel bedeutend abgelenkt; dieselbe könnte jedoch höchstens um einen rechten Winkel abgelenkt werden, wenn der Strom unendlich stark wäre. Ist jedoch der Strom schwach, im Vergleich zu der richtenden Kraft des Magnetismus, so wird die Nadel nur unbedeutend abgelenkt.

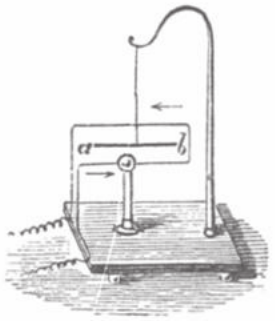


Fig. 102.

Eine solche Vorrichtung kann daher als **Galvanoskop** oder Stromanzeiger dienen; denn die Bewegung der Nadel zeigt die Richtung des Stromes und giebt an, ob derselbe stark oder schwach ist. Dieser Apparat ist indessen zu unempfindlich, um sehr schwache Ströme anzuzeigen. Um ein empfindlicheres Instrument zu erhalten, kann man zwei verschiedene Wege einschlagen: 1) Man kann die wirksame Kraft des Stromes dadurch erhöhen, dass man den Draht mehrere Male um die Nadel herum führt. 2) Man kann die dem Strome entgegenwirkende,

richtende Kraft des Erdmagnetismus durch eine kompensierende Vorrichtung schwächen.

195. Schweigger's Multiplikator. Das erste der obigen Mittel wurde von Schweigger angewandt, welcher einen *Multiplikator* von zahlreichen Drahtwindungen konstruierte. Ein passender Rahmen aus Holz, Metall oder Ebonit wird zur Aufnahme des Drahtes zubereitet; dieser letztere muss jedoch »isoliert«, d. h. mit Seide, Baumwolle oder Guttapercha umwickelt werden, damit die einzelnen Windungen der Rolle einander nicht berühren. Innerhalb dieses Rahmens, welcher kreisförmig oder elliptisch sein oder, was gebräuchlicher ist, die Form eines Rechtecks haben kann, wie in Fig. 103, wird die Nadel aufgehängt, wobei der Rahmen so gestellt wird, dass die Drahtwindungen im magnetischen Meridiane liegen. Je grösser die Anzahl der Windungen ist, um so kräftiger ist die Ablenkung des Magnets, welche ein und dieselbe Elektrizitätsmenge bei ihrem Durchfliessen durch die Windungen hervorruft. Ist jedoch der Draht dünn, oder die Anzahl der Drahtwindungen sehr gross, so kann der Widerstand, welchem die strömende Elektrizität begegnet, die Stärke des Stromes bedeutend beeinträchtigen. Der Leser wird die Wichtigkeit dieser Bemerkung begreifen, wenn er das Kapitel über das Ohm'sche Gesetz gelesen hat. Cumming von Cambridge scheint zuerst zur *Messung* des Stromes eine Rolle gebraucht zu haben, welche eine auf einer Spitze schwebende Nadel umgiebt. Ihm verdanken wir den Ausdruck *Galvanometer.*

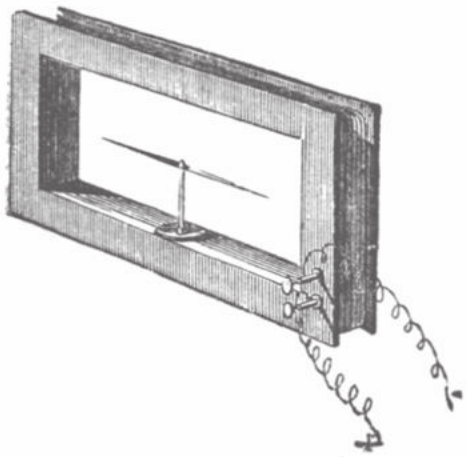


Fig. 103.

196. Astatische Verbindungen. Die richtende Kraft, welche der Erdmagnetismus auf eine Magnetnadel ausübt, kann durch eine der beiden folgenden Methoden reduziert oder beseitigt werden:

a) Haüys Methode: Anwendung eines *kompensierenden Magnets.*

Hält man einen gewöhnlichen, langen Stabmagnet horizontal in den magnetischen Meridian, doch so, dass sein nordsuchender Pol nach Norden gerichtet ist, so veranlasst derselbe eine über oder unter ihm schwebende Magnetnadel, sich mit ihrem südsuchenden Pol nach Norden einzustellen. Befindet sich der Stabmagnet in unmittelbarer Nähe der Nadel, so kann er die richtende Kraft der Erde überwinden und die Nadel veranlassen, sich umgekehrt wie gewöhnlich einzustellen. Befindet er sich in grösserer Entfernung, so kann derselbe die richtende Kraft der Erde bloss schwächen. In einer bestimmten Entfernung wird der Magnet diese Kraft gerade aufheben, so dass die Nadel dann neutral ist. Von dieser Anordnung zur Schwächung der richtenden Kraft der Erde macht man beim Spiegel-Galvanometer (Fig. 115) Gebrauch, bei welchem der oben angebrachte Magnet, welcher gekrümmt ist und in beliebiger Höhe befestigt werden kann, ein Mittel gewährt, dem Apparate den gewünschten Grad von Empfindlichkeit zu verleihen, indem man den Magnet höher oder tiefer stellt.

b) Nobili's Methode: Anwendung eines *astatischen Paares* von Magnetnadeln. Werden zwei magnetisierte Nadeln von gleicher Stärke und Grösse durch einen dünnen Messing- oder Aluminiumdraht in umgekehrter Ordnung mit einander verbunden (Fig. 104), so wird der Kraft, welche die eine Nadel in den magnetischen Meridian zu stellen strebt, von der auf die andere Nadel wirkenden Kraft genau das Gleichgewicht gehalten. Folglich bleibt dieses Nadelpaar in jeder ihm gegebenen Stellung stehen, und ist vom Erdmagnetismus unabhängig. Eine solche Verbindung ist unter dem Namen **astatisches Paar** bekannt. In der Praxis ist es jedoch schwierig, ein vollkommen astatisches Paar herzustellen, da es nicht leicht ist, zwei Nadeln bis zu genau demselben Grade zu magnetisieren; auch ist es schwierig, sie ganz genau parallel zu

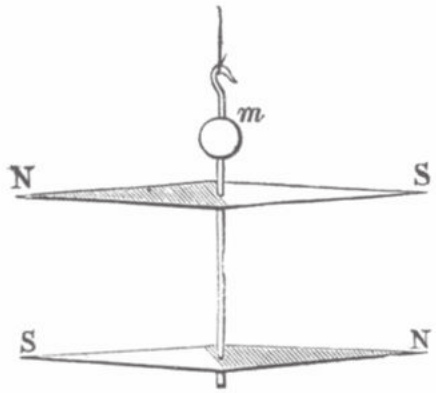


Fig. 104.

einander zu befestigen. Ein solches astatisches Paar wird sofort durch einen Strom abgelenkt, welcher durch einen um eine der Nadeln gerollten Draht fliesst; denn wie Fig. 105 zeigt, dreht der Strom, welcher oberhalb der einen Nadel und unterhalb der andern fliesst, beide in demselben Sinne, da sie sich bereits in umgekehrter Lage befinden. Man kann sogar noch weiter gehen und den Draht um beide Nadeln führen, indem man den Draht um die obere Nadel im entgegengesetzten Sinne, wie um die untere Nadel windet.

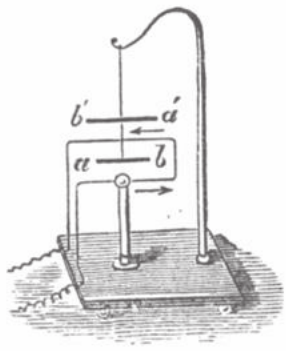


Fig. 105.

Nobili wandte ein astatisches Nadelpaar in Schweigger's Multiplikator an und konstruierte auf diese Weise einen höchst empfindlichen Apparat, das *astatische Galvanometer* (Fig. 112). Die Beschreibung der besonderen Galvanometerformen, welche zur Strommessung geeignet sind, findet sich in der nächsten Vorlesung.

197. Erzeugung eines magnetischen Feldes durch einen Strom. Fliesst ein Strom durch einen Kupferdraht, so ist derselbe im Stande, wie Arago fand, Eisenfeilspähne anzuziehen, so lange der Strom durch ihn hindurchfliesst. Diese Eisenfeilspäne stellen sich rechtwinklig zum Drahte und haften rings um denselben, fallen jedoch ab, sobald der Schliessungskreis unterbrochen wird. Es wird also rings um den den Strom leitenden Draht ein magnetisches Feld erzeugt, und es ist von Wichtigkeit, zu untersuchen, in welcher Weise die Kraftlinien in diesem Felde verteilt sind.

Angenommen, der Punkt in der Mitte von Fig. 106 stelle den Querschnitt des Drahtes vor, und der Strom hätte die Richtung vom Leser zum Papier. Dann ist nach der Ampèreschen Regel eine darunter gehaltene Magnetnadel bestrebt, sich in die angegebene Lage einzustellen, mit ihrem N-Pole nach links weisend[1]). Eine Nadel oberhalb des Drahtes stellt der

1) Wenn der Leser irgend welcher Schwierigkeit begegnet, die Ampèresche Regel auf diesem und die folgenden Fälle anzuwenden, so sollte er genau an folgender Vorstellung festhalten. Der mit »in« markierte Punkt möge

Strom in die entgegengesetzte Lage. Eine Nadel zur Rechten des Stromes stellt sich rechtwinklig zum Strome (d. h. in die Ebene des Papiers), mit ihrem N-Pole nach unten gerichtet, während der N-Pol einer Nadel zur Linken nach oben gerichtet sein würde. In der That würde der N'-Pol um den Konduktor in demselben Sinne gedreht werden, in welchem sich die Zeiger einer Uhr bewegen; während der S-Pol im entgegengesetzten Sinne gedreht werden würde. Fliesst der Strom umgekehrt, d. h. in der Richtung zum Leser, so dass er aus der Ebene des Papiers heraustritt, wie in Fig. 107, so würden die Bewegungen gerade in umgekehrter Weise erfolgen. Daraus scheint zu folgen, dass der nordsuchende Pol eines Magnets sich beständig rings um einen Strom drehen müsste; da es jedoch nicht möglich ist, einen Magnet mit bloss einem Pole herzustellen, und da der südsuchende Pol im entgegengesetzten Sinne getrieben wird, so ist die ganze Wirkung die, dass sich die Nadel in die Richtung einer Tangente an einen den Konduktor einschliessenden Kreis einstellt. Das den Konduktor umgebende Feld besteht in der That aus einer Art magnetischen Stromes, welcher in der Nachbarschaft des Drahtes am stärksten ist. Dies hatte Oersted im Sinne, wenn er von dem »drehenden Einflusse« des elektrischen Stromes auf die Magnetnadel sprach. Das Kraftfeld mit seinen kreisförmigen Linien, welche einen in einem geradlinigen Konduktor fliessenden Strom umgeben, lässt sich experimentell mit Eisenfeilspänen auf folgende Weise untersuchen: Man befestigt ein Kartenblatt horizontal

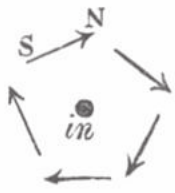


Fig. 106.

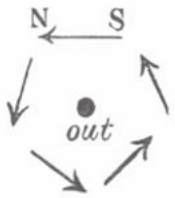


Fig. 107.

---

eine Oeffnung im Boden darstellen, in welche der Strom hineinfliesst, und in welche der Leser mit dem Kopfe voran hineinfährt. So lange er sich in der Oeffnung befindet, muss er sich so wenden, dass er jeden der Magnete der Reihe nach ansieht, und sich erinnern, dass in jedem Falle der nordsuchende Pol nach seiner Linken abgelenkt wird. Bei Fig. 107 muss er sich vorstellen, als käme er aus der Oeffnung heraus, wo der Strom aus dem Boden ausfliesst.

und führt durch eine Oeffnung in demselben einen starken vertikalen Kupferdraht (Fig. 108). Dann siebt man Eisenfeilspäne über das Blatt und sendet einen starken Strom von 3 bis 4 grossen Elementen durch den Draht. Klopft man dann leise auf das Blatt, so gruppieren sich die in der Nähe des Drahtes befindlichen Späne in konzentrischen Kreisen um denselben. Infolge dieses Feldes können zwei Konduktoren eine Fernwirkung auf einander ausüben. Fliessen beide Ströme in derselben Richtung, so haben ihre magnetischen Felder das Bestreben sich zu verschmelzen und die resultierende Spannung im Medium hat eine Anziehung derselben zur Folge. Fliessen die Ströme in entgegengesetzter Richtung, so findet infolge der Spannungen des umgebenden magnetischen Feldes eine Abstossung derselben statt (vergl. Art. 384).

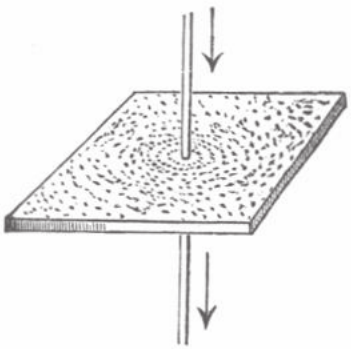


Fig. 108.

Bekanntlich wird zur Erzeugung eines magnetischen Feldes Energie verbraucht. Wird ein Strom durch einen Draht geschickt, so wächst das magnetische Feld um denselben, und die Energie der Batterie wird zum Teil hierauf verwandt, während der Strom wächst. Dass elektrische Ströme nicht *sofort* bis zu ihrer schliesslichen Stärke anwachsen, hat seinen Grund mit in der Reaktion des umgebenden magnetischen Feldes. Kein Strom kann ohne letzteres fliessen. In der That ist das, was wir schlechthin einen elektrischen Strom *in* einem Drahte nennen, nichts anderes als dieses äussere magnetische Feld.

198. Aequivalente magnetische Schale: Ampère's Theorem. Für viele Zwecke ist die folgende Vorstellungsweise von der magnetischen Wirkung elektrischer Ströme geeigneter als die vorhergehende. Man verbinde die Enden einer Batterie durch einen Schliessungsdraht, welchen man, wie in Fig. 109, an einer Stelle zu einer Schlinge umbiegt. Dann ergiebt sich, dass der ganze von der Schlinge begrenzte Raum magnetische Eigenschaften besitzt. Wir wollen annehmen,

dass der Strom in unserer Figur, von oben gesehen, in derselben Richtung durch die Schlinge fliesst, wie die Zeiger einer Uhr sich bewegen; eine im Drahte schwimmend gedachte Person, welche stets nach dem Mittelpunkte der Schlinge sieht,

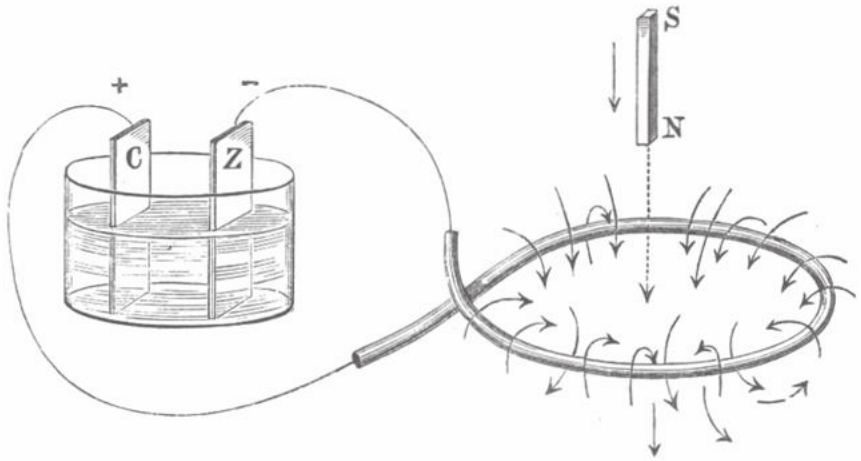


Fig. 109.

würde mit dem linken Arme nach unten zeigen. Folglich würde nach der Ampère'schen Regel ein N-Pol nach unten durch die Schlinge getrieben werden, ein S-Pol dagegen nach oben. In der That verhält sich der von der Schlinge des Drahtes begrenzte Raum wie eine *magnetische Schale* (vergl. Art. 118), welche an ihrer oberen Seite südsuchenden Magnetismus und an ihrer untern Seite nordsuchenden Magnetismus enthält. In jedem Falle lässt sich darthun, dass *ein geschlossener Volta'scher Bogen gleichbedeutend ist mit einer magnetischen Schale, deren Ränder mit dem Stromkreis zusammenfallen*, wobei die Stärke der Schale derart ist, dass die Anzahl ihrer Kraftlinien gleich der Anzahl der Kraftlinien ist, welche von dem im Bogen fliessenden Strome herrühren. Der Stromkreis wirkt auf einen Magnet anziehend oder abstossend, und wird selbst von einem Magnet angezogen oder abgestossen, genau so, wie sich eine äquivalente magnetische Schale verhalten würde. Auch wirkt auf den Stromkreis selbst, wenn er in ein magnetisches Feld gebracht wird, dieselbe Kraft wie auf seine äquivalente magnetische Schale.

199. Maxwell's Regel. Professor Clerk Maxwell, welcher diese Methode entwickelte, stellte folgende elegante Regel auf,

um die gegenseitige Wirkung eines Stromes und eines in seiner Nähe befindlichen Magnets zu bestimmen. *Auf jeden Teil des Schliessungsbogens wirkt eine Kraft, welche ihn so zu richten strebt, dass derselbe innerhalb seiner Begrenzung die grösstmögliche Anzahl von Kraftlinien einschliesst.* Ist der Schliessungsbogen fest und der Magnet beweglich, so ist die auf den Magnet wirkende Kraft ebenfalls derart, dass sie die Anzahl der durch den Schliessungsbogen gehenden Kraftlinien zu einem Maximum zu machen sucht. (Vergl. auch Art. 344.) Dies ist nur ein besonderer Fall eines allgemeinen Gesetzes, welches für jedes elektromagnetische System gilt, nämlich: *Jedes elektromagnetische System ist bestrebt, eine solche Stellung einzunehmen, dass die magnetischen Linien, welche durch den erregenden Schliessungsbogen führen, zu einem Maximum werden.* (Art. 374.)

200. De la Rive's schwimmende Batterie. Die vorstehenden Bemerkungen lassen sich experimentell mit Hilfe einer kleinen schwimmenden Batterie darthun. Eine Zinkplatte

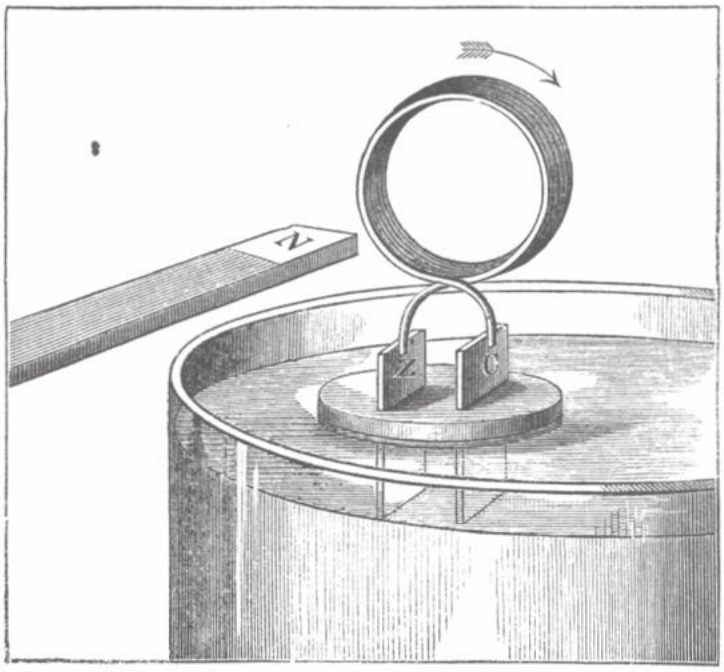


Fig. 110.

und eine Kupferplatte (Fig. 110) werden parallel zu einander in einem grossen Korke befestigt und ihre oberen Enden durch eine kreisförmig gebogene Rolle aus bewickeltem Kupferdrahte verbunden. Beide Platten schwimmen auf einer mit verdünnter

Schwefelsäure gefüllten Schale. Wird dem Ringe der eine Pol eines Stabmagnets genähert, so wird derselbe angezogen oder abgestossen, je nachdem es ein N-Pol oder S-Pol ist. Der schwimmende Schliessungsbogen bewegt sich derart, dass die durch den Ring führenden magnetischen Linien ein Maximum werden. Wird der S-Pol des Magnets derjenigen Seite des Ringes genähert, welche als ein Südsuchender Pol wirkt (d. h. derjenigen Seite, durch welche der Strom in der Richtung der Bewegung eines Uhrzeigers fliesst), so stösst er dieselbe ab. Wird der Pol mitten in den Ring gehalten, so wird die Batterie kräftig abgestossen, schwimmt fort und wendet sich so, dass sie dem S-Pole des Magnets ihre nordsuchende Seite zukehrt. Dann wird diese angezogen und die Batterie bewegt sich derart, dass die Mitte des Magnets sich innerhalb des Ringes befindet, in welcher Lage möglichst viele Kraftlinien die Ringfläche durchkreuzen.

Es lässt sich auch nachweisen, dass zwei von elektrischen Strömen durchflossene Schliessungsbögen einander anziehen und abstossen, gerade wie 2 magnetische Schalen es thun würden.

In der 31. Vorlesung über Elektromagnete wird gezeigt werden, wie man ein Stück Eisen oder Stahl magnetisieren kann, wenn man dasselbe mit einem spiralförmig gewundenen Drahte umgiebt und durch diesen einen Strom schickt.

201. Stromstärke im magnetischen Maße. Wenn ein Strom auf diese Weise auf einen in seiner Nähe befindlichen Magnetpol wirkt, so ist die von ihm ausgeübte Kraft f der Stromstärke i, der Stärke m des Magnetpols und der Länge ι des benutzten Drahtes proportional; dagegen umgekehrt proportional dem Quadrate des Abstandes r des Magnetpols vom Schliessungsbogen, oder $f = \frac{i\,l\,m}{r^2}$ Krafteinheiten. Ist der Draht in Gestalt eines Kreises um den Magnetpol geführt, so ist $l = 2\,\pi\,r$ und $f = \frac{2\,\pi\,i}{r} \cdot m$ Krafteinheiten. Nimmt man ferner an, dass der Radius des Kreises = 1 cm und die Stärke des

Magnetpols gleich einer Einheit ist, so ist die Kraft, welche der Stromstärke i entspricht, $\frac{2\pi i}{1} \times 1 = 2\pi i$ Krafteinheiten. Damit also ein Strom von der Stärke i eine Kraft von i Einheiten auf den Einheitspol ausübt, muss man sich denken, dass der Strom nur $\frac{1}{2\pi}$tel des Kreises durchfliesst, oder einen Bogen, dessen Länge gleich dem Radius ist.

202. Einheit der Stromstärke. Man sagt, ein Strom habe die Stärke einer »absoluten« Einheit, wenn derselbe beim Durchfliessen eines Drahtes von einem Zentimeter Länge, der einen Bogen eines Kreises von 1 cm Radius bildet, auf einen Magnetpol von der Stärke 1, welcher sich im Mittelpunkte des Bogens befindet, eine Krafteinheit ausübt. Die praktische Einheit »eines *Ampère*« beträgt nur den 10. Teil dieser theoretischen Einheit. (Vergl. auch Art. 349). Ist der Draht nicht gewunden, sondern gerade und beliebig lang, so ist die Kraft, welche der durch ihn fliessende Strom auf einen Pol von der Stärke m in einem benachbarten Punkte P ausübt, dem einfachen Abstande (nicht dem Quadrate desselben) umgekehrt proportional, und der Pol ist bestrebt, sich rechtwinklig zu stellen sowohl in Bezug auf den Draht als auch in Bezug auf die Linie OP. In Fig. 111 ist der absteigende Strom, gemäss der obigen Korkzieherregel, bestrebt, einen in P befindlichen N-Pol nach dem Beschauer hin zu bewegen. Hat der Strom eine Stärke von i Ampère, so ist die auf einen Pol von m Einheiten ausgeübte Kraft

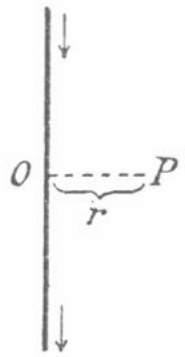


Fig. 111.

$$f = \frac{2mi}{10r} \text{ Krafteinheiten.}$$

Beispiel: Stromstärke = 60 Ampère; Polstärke = 200 Einheiten Abstand = 2 cm; mithin f = 1200 Krafteinheiten; oder wenn wir durch g = 981 dividieren, circa 1,22 Gramm.

XVII. VORLESUNG: *Von den Galvanometern.*

203. Mit dem Ausdrucke **Galvanometer** wird ein Apparat bezeichnet, mit welchem man die Stärke elektrischer Ströme durch ihre elektromagnetische Wirkung misst. Es giebt 2 Arten Galvanometer: 1) solche, bei denen der Strom in einer festen Drahtspule fliesst und eine auf einer Spitze schwebende Magnetnadel zur Ablenkung bringt und 2) solche, bei denen der Strom in einer beweglichen Spule fliesst; letztere schwebt zwischen den Polen eines feststehenden Magnets und wird dadurch in Drehung versetzt. Es giebt noch einen dritten Apparat, (zum Unterschiede *Elektrodynamometer* genannt, cfr. Art. 389) bei welchem sowohl der bewegliche als auch der feststehende Teil aus Spulen besteht. Diese letzteren Apparate werden besonders bei Wechselströmen benutzt. Die einfache, in Art. 194 beschriebene Vorrichtung wurde ein »Galvanoskop« oder *Stromanzeiger* genannt; dieselbe konnte aber füglich nicht »Galvanometer« [1]) oder *Strommesser* genannt werden, da ihre Angaben nur qualitativ und nicht quantitativ waren. Die Angaben der Nadel gewährten keine genau Kenntnis von der Stärke des durch den Apparat fliessenden Stromes. Ein gutes Galvanometer muss die wesentliche Bedingung erfüllen, dass die Stromstärke durch seine Angaben in zuverlässiger Weise wirklich *gemessen* wird. Auch sollte dasselbe für die zu messenden Ströme eine hinreichende Empfindlichkeit besitzen. Das Galvanometer, welches zur Messung sehr kleiner Ströme tauglich ist (etwa eines Stromes von nur 1 bis 2 Milliontel eines *Ampère)*, ist zur Messung sehr starker Ströme, wie dieselben zur Erzeugung des elektrischen Lichtes oder zur galvanischen Versilberung gebraucht werden, nicht ge-

1) Bisweilen nennt man diese Apparate noch »Rheoskop« und »Rheometer«. Ein Stromunterbrecher wird häufig ein »Rheotom« genannt, und der in Fig. 129 abgebildete Kommutator oder Stromwender heisst in einigen Büchern »Rheotrop«. Doch sind diese Ausdrücke jetzt nicht mehr gebräuchlich.

eignet. Starke Ströme erfordern dicke Drähte, und es genügt eine Rolle mit nur wenigen Windungen. Sollen sehr schwache Ströme eine Ablenkung der Nadel bewirken, so müssen sie bis 1000mal um dieselbe zirkulieren, und die Rolle muss eine ebenso grosse Anzahl von Windungen haben; doch kann der Draht sehr dünn sein. Befindet sich in dem Schliessungsbogen des zu messenden Stromes schon ein grosser Widerstand (wie z. B. ein mehrere Meilen langer Telegraphendraht), so ist ein Galvanometer mit kurzer, aus nur wenigen Drahtwindungen bestehender Rolle unbrauchbar, und man muss ein Galvanometer mit einer Rolle anwenden, wo viele Drahtwindungen um die Nadel geführt sind. Den Grund hiefür findet man später (Art. 403). Hieraus ergiebt sich, dass verschieden konstruierte Instrumente nötig sind, je nach der Art der Untersuchung; bei allen ist jedoch erforderlich, dass sie eine quantitative Messung zulassen und dass sie für den zu messenden Strom hinreichend empfindlich sind, ohne dass eine zu starke Erwärmung des Drahtes stattfindet.

204. Methoden der Hemmung. Bei allen Galvanometern ist eine hemmende Kraft erforderlich, gleichviel ob der Magnet oder die Rolle beweglich ist; denn sonst würde der schwächste Strom den Zeiger vollständig umdrehen. Soll der stärkere Strom eine grössere Ablenkung bewirken als der schwächere, so muss eine Kraft thätig sein, welche die Ablenkung zu verkleinern strebt. Solche Kräfte sind:

a) Der Erdmagnetismus. Wird die Nadel auf eine Spitze gestellt oder an einen Faden aufgehängt, so ist der Erdmagnetismus bestrebt, dieselbe wieder in den magnetischen Meridian zu ziehen. Diese Methode ist bei Galvanometern mit beweglichen Nadeln sehr gebräuchlich.

b) Die Torsion eines Drahtes. Der bewegliche Teil tordiert bei seiner Drehung den zur Aufhängung benutzten Draht, der sich dann zu detordieren strebt, und zwar mit einer Kraft, welche gleichzeitig mit dem Ablenkungswinkel zunimmt. Diese Methode ist bei Galvanometern mit beweglichen Rollen gebräuchlich.

c) Schwerkraft. Wenn die Nadel sich in einem Zapfenlager, innerhalb einer vertikalen Ebene bewegt, wird sie an dem einen Ende mit einem Gewicht belastet.

d) Permanenter Magnet. Um einen Nadelapparat unabhängig von seiner Lage zu machen, kann man denselben mit einem kräftigen äussern Stahlmagnet kombinieren, welcher die Nadel auf Null zurück bewegt.

e. Bifilare Aufhängung. Wird eine Nadel oder eine Rolle an zwei parallelen Fäden aufgehängt, so strebt dieselbe infolge der Schwerkraft in ihre Anfangslage zurückzukehren. Damit der Apparat recht empfindlich ist, muss man die hemmende Kraft so viel wie möglich abschwächen.

205. Methoden der Beobachtung. Beim Gebrauch eines Galvanometers lassen sich folgende Methoden der Beobachtung anwenden:

a) Methode der Ablenkung. Der Winkel, um welchen der bewegliche Teil (Nadel oder Rolle) abgelenkt wird, wird mittels eines Index oder eines reflektierten Lichtstrahls auf einer Skala abgelesen, nachdem der bewegliche Teil zur Ruhe gekommen ist.

b) Torsionsmethode. Der bewegliche Teil wird mittels eines Drahtes an einer Torsionsscheibe aufgehängt, welche so lange gedreht wird, bis der Index wieder auf Null steht. Die hemmende Kraft hält dann der ablenkenden Kraft das Gleichgewicht. Diese Methode, welche von Ohm herrührt, ist sehr zuverlässig und wird bei dem Elektrodynamometer von Siemens angewendet.

c) Methode der ersten Schwingung. Anstatt so lange zu warten, bis der bewegliche Teil zur Ruhe kommt, kann man die erste Schwingung beobachten. Diese Methode, welche bei plötzlichen Entladungen oder bei vorübergehenden Strömen allein anwendbar ist, heisst die *ballistische* Methode (vergl. Art. 213). Wird der bewegliche Teil in seiner Bewegung nicht gehemmt, so ist die erste durch einen Batteriestrom hervorgebrachte Schwingung gerade doppelt so gross, wie die schliessliche Ablenkung.

d) Oscillationsmethode. Anstatt der Ablenkung kann man auch die Schwingungszeit der Nadel beobachten, wobei die

Rolle rechtwinklig zum magnetischen Meridian einzustellen ist. Bei dieser Methode ist der Erdmagnetismus in Anschlag zu bringen (vergl. Art. 133).

e) Methode der Verstärkung. Bei sehr schwachen Strömen wendet man häufig eine Methode an, wobei man dadurch eine messbare Schwingung erzielt, dass man in dem Augenblicke, wo die Nadel den Nullpunkt passiert, den Strom umkehrt. Bisweilen benutzt man hierbei einen rotierenden Kommutator von besonderer Konstruktion, damit die auf einander folgenden Impulse sich gegenseitig verstärken.

f) Null-Methoden. In vielen Fällen wendet man Kombinationen an (Wheatstone's Brücke, Differentialgalvanometer etc.) und zwar in der Weise, dass kein Strom durch das Galvanometer fliesst, wenn die Bedingungen des elektrischen Gleichgewichts erreicht sind. Solche Methoden, welche meistens ungemein zuverlässig sind, sind unter dem Namen Null-Methoden bekannt. Bei ihnen sind empfindliche Galvanometer anwendbar, ohne dass die Graduierung ihrer Skala von grosser Bedeutung ist.

206. Nobili's astatisches Galvanometer. Der von Nobili konstruierte Apparat besteht aus einem astatischen Nadelpaar, welches sehr empfindlich aufgehängt ist, und zwar so, dass die untere Nadel zwischen einer Drahtrolle schwebt, welche auf einen Rahmen von Elfenbein gewunden ist (Fig. 112). Dieser Apparat war lange Zeit eine beliebte Form eines empfindlichen Galvanometers. Da die Nadeln desselben vom Erdmagnetismus unabhängig sind, so stellen sie sich entsprechend der Torsion des dünnen Drahtes, an welchem sie aufgehängt sind. Den Rahmen, über welchen die Rolle gewunden ist, muss man ganz genau parallel zu den Nadeln auf-

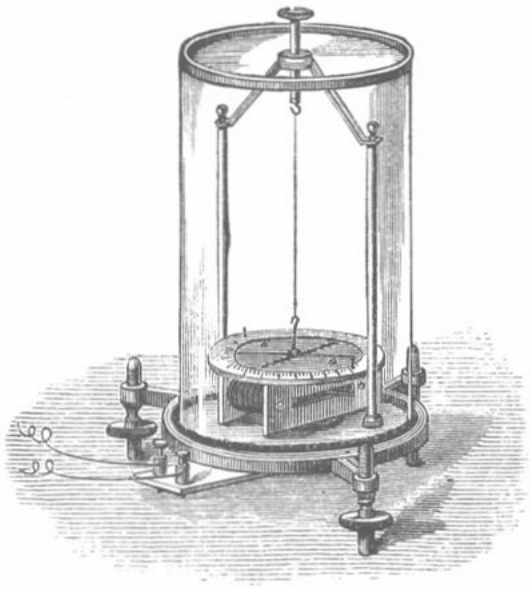


Fig. 112.

stellen. Drei Schraubenfüsse dienen dazu, die Grundfläche des Instruments horizontal zu stellen. Ein gläsernes Gehäuse schützt gegen Luftströmungen. Wird ein Strom durch die Drahtrollen geschickt, so bewegen sich die Nadeln zur Rechten oder Linken über einem graduierten Kreise. Sind die Ablenkungen *gering* (d. h. weniger als 10 bis 15 Grad), so sind dieselben fast genau der Stärke der sie erzeugenden Ströme proportional. Bewirkt z. B. ein Strom eine Ablenkung von 6°, so ist derselbe annähernd 3mal so stark wie ein Strom, welcher die Nadel bloss um 2° ablenkt. Dieses näherungsweise giltige Verhältnis verliert jedoch seine Richtigkeit, wenn die Ablenkung mehr als 15 bis 20° beträgt. Denn in diesem Falle wirkt der Strom auf die Nadel nicht mehr so vorteilhaft, da ihre Pole sich dann nicht mehr innerhalb der Rollen befinden, sondern an der Seite über dieselben hinausragen, und da überdies die Nadel zu der auf sie wirkenden Kraft schief steht, so wird erstere nur noch von einem Teile der Kraft abgelenkt, entgegen der richtenden Kraft des Aufhängedrahtes; der andere Teil der Kraft bewegt die Nadel der Länge nach, was hier nicht in Betracht kommt. Man kann jedoch das Galvanometer »*kalibrieren*«, d. h. man kann durch besondere Messungen oder durch Vergleichung mit einem Normalapparat feststellen, welche Stromstärke einer gewissen Ablenkung entspricht. Nimmt man z. B. als schon bekannt an, dass eine Ablenkung von 32° an einem besondern Galvanometer durch einen Strom von $\frac{1}{100}$ Ampère erzeugt wird, dann erzeugt ein Strom von jener Stärke an jenem Apparate *stets* dieselbe Ablenkung, vorausgesetzt, dass die hemmende Kraft sich nicht zufällig geändert hat.

207. Die Tangentenbussole. Aus den oben angeführten Gründen ist es unmöglich, ein Galvanometer zu konstruieren, bei welchem der (in Graden gemessene) *Winkel*, um welchen die Nadel abgelenkt wird, für alle Grössen der Stromstärke proportional ist. Möglich dagegen ist es, ein sehr einfaches Galvanometer zu konstruieren, bei welchem die *Tangente* des Ablenkungswinkels der Stromstärke genau proportional ist. Das

Wesentliche aller Tangentenbussolen ist, dass die Rolle im Verhältniss zur Nadel sehr gross ist. Fig. 113 zeigte eine für

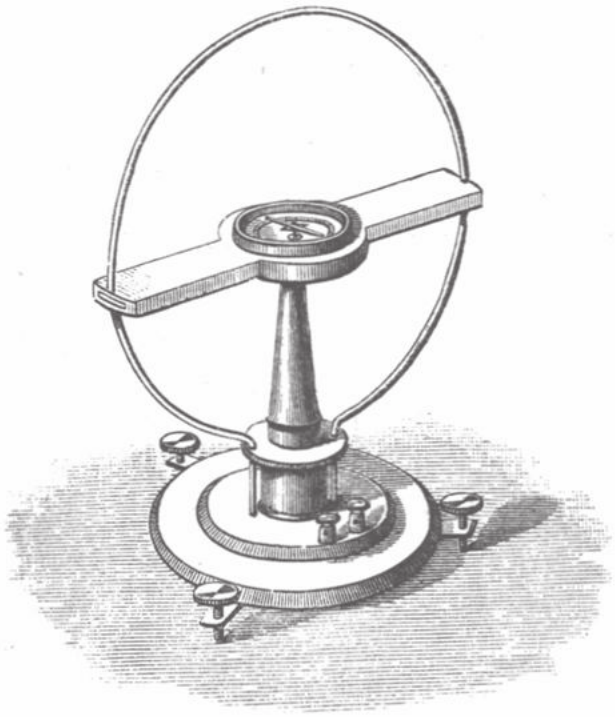


Fig. 113.

starke Ströme geeignete Form der **Tangentenbussole**. Die Rolle dieses Apparates besteht aus einem einfachen Ringe von dickem Kupferdrahte, dessen Durchmesser 25 bis 40 cm beträgt. Im Mittelpunkte wird eine magnetisierte, nicht mehr als 2—3 cm lange Stahlnadel leicht beweglich aufgehängt, welche gewöhnlich noch mit einem leichten Zeiger aus Aluminium versehen ist. Der Apparat wird eingestellt, indem man die Ebene des Drahtkreises in den magnetischen Meridian stellt, so dass also die kleine Nadel sich in der Ebene der Rolle befindet. Das »Feld«, welches ein durch den Kreis fliessender Strom erzeugt, ist im Mittelpunkte und in der Nachbarschaft desselben sehr gleichmässig, und die Kraftlinien sind dort wirklich senkrecht zur Ebene der Rolle. Dies gilt aber nicht von andern Stellen innerhalb des Kreises, da die Kraft weder gleichmässig, noch senkrecht wirkt, ausgenommen *in der Ebene* der Rolle und *in ihrem Mittelpunkte*. Bei der geringen Grösse der Nadel sind ihre Pole nie weit vom Mittelpunkte entfernt, und gelangen daher niemals an Stellen, wo die magnetische Kraft unregelmässig

ist[1]). Jede magnetische Kraft, welche der Strom in der Rolle auf die Nadel ausübt, wirkt senkrecht zur Ebene des Kreises und deshalb rechtwinklig zum magnetischen Meridian. Nun wurde in Art. 137 bewiesen, dass die magnetische Kraft, welche rechtwinklig zum Meridian wirkt und an einer Magnetnadel die Ablenkung δ erzeugt, gleich der horizontalen Kraft des Erdmagnetismus an jenem Orte ist, multipliziert mit der *Tangente* des Ablenkungswinkels. Daher lenkt ein in der Rolle fliessender Strom die Nadel um einen Winkel ab, *dessen Tangente der Stromstärke proportional ist.*

Beispiel. Angenommen, eine Batterie erzeugte an einem Tangenten-Galvanometer eine Ablenkung von 15^0, und eine zweite stärkere Batterie eine Ablenkung von 30^0. Die Stromstärken verhalten sich dann nicht wie 15 zu 30, sondern wie tang 15^0 zu tang 30^0. Diese Werte hat man einer trigonometrischen Tafel zu entnehmen, und man findet alsdann, dass das Verhältnis der Stromstärken wie 0,268 zu 0,577 ist, oder annähernd wie 10 zu 22. Oder allgemeiner: Wenn der Strom C die Ablenkung δ und C' die Ablenkung δ' erzeugt, so ist:

$$C : C' = \text{tang } \delta : \text{tang } \delta'.$$

Um das Nachschlagen in einer Tabelle zu ersparen, werden auf der Kreisskala des Apparates bisweilen die Tangentenwerte statt der Bogengrade verzeichnet. Man ziehe eine Tangente OT an den Kreis (Fig. 114) und trage auf dieser Linie von O aus mehrere gleiche Teile ab und verbinde die Teilpunkte mit dem Mittelpunkte. Auf diese Weise wird der Kreis in eine Anzahl

---

1) Um die Gleichmässigkeit des Feldes mit Sicherheit zu erhalten, schlug Gaugain vor, die Nadel in einem Punkte der Achse der Rolle aufzuhängen, dessen Entfernung vom Mittelpunkte gleich dem halben Radius der Rolle wäre. Die Anordnung von v. Helmholtz, bestehend in 2 parallelen Rollen, die symmetrisch auf beiden Seiten der Nadel sind, ist besser; und ein Galvanometer aus 3 Rollen, von denen die mittlere grösser, als die beiden andern ist, so dass alle drei etwa in der Oberfläche einer Kugel liegen, in deren Zentrum sich die kleine Nadel befindet, ist der geeignetste Apparat zur Erzielung eines gleichmässigen Feldes im Mittelpunkte.

Sektoren zerlegt, von denen die dem Punkte O zunächst liegenden fast gleich sind, welche jedoch immer kleiner werden, je

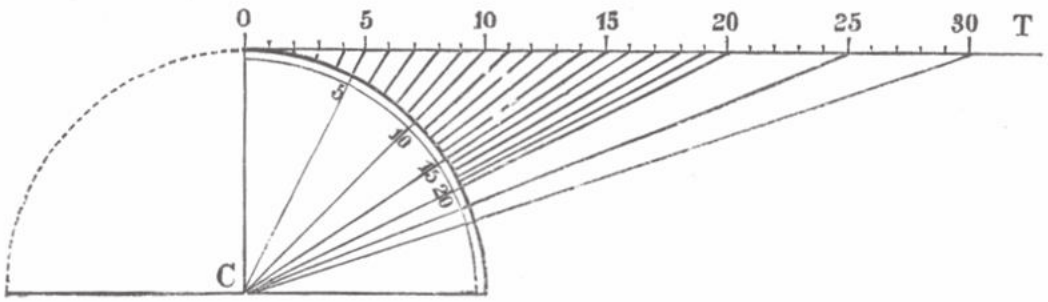


Fig. 114.

mehr man sich von O entfernt. Diese ungleichen Sektoren entsprechen gleichen Zunahmen der Tangente. Wäre die Skala auf diese Weise angefertigt, so wären die Ablesungen den Tangenten proportional. Es ist jedoch schwieriger, einen Bogen mit Genauigkeit in Tangentenlinien, als in gleiche Grade zu teilen; deshalb wendet man diese allerdings bequeme Einteilung nicht an, wenn es sich um grosse Genauigkeit handelt.

208. Absolute Strommessung mit der Tangentenbussole. Mit Hilfe der Tangentenbussole lässt sich die Stärke eines Stromes in »absoluten« Einheiten angeben, wenn die »Konstanten« des Apparates bekannt sind. Die Tangente des Ablenkungswinkels giebt (vergl. Art. 137) das Verhältnis der vom Strome herrührenden magnetischen Kraft zur horizontalen Komponente des Erdmagnetismus an. Beide Kräfte wirken auf die Nadel und sind in *gleicher* Weise von dem magnetischen Moment der Nadel abhängig, welches wir deshalb in diesem Falle nicht zu kennen brauchen. Wir wissen, dass die vom Strome im Mittelpunkte der Rolle ausgeübte Kraft dem Produkte aus der horizontalen Komponente des Erdmagnetismus und der Tangente des Ablenkungswinkels proportional ist. Diese beiden Grössen erhält man aus den Tafeln, und aus ihnen berechnen wir den absoluten Wert des Stromes wie folgt: Es möge r den (in Zentimetern gemessenen) Radius der Galvanometer-Rolle bedeuten; die gesamte Länge derselben ist dann $2r\pi$ (wenn sie bloss aus einer Windung besteht). Der Abstand aller Teile der

Rolle vom Mittelpunkte ist natürlich $= r$. Aus unserer Definition für die Einheit der Stromstärke (Art. 202) folgt, dass die (in Krafteinheiten gemessene) Kraft im Mittelpunkte gleich

$$i \cdot \frac{2\pi r}{r^2} = i \cdot \frac{2\pi}{r} = \mathrm{H} \cdot \operatorname{tang} \delta \text{ ist,}$$

folglich:

$$i = \frac{r}{2\pi} \cdot \mathrm{H} \cdot \operatorname{tang} \delta.$$

Die Grösse $\frac{r}{2\pi}$ heisst der »Reduktionsfaktor« des Galvanometers und wird mit G bezeichnet. Folglich ist der Wert des Stromes in absoluten (elektromagnetischen) Einheiten [1]), $i = \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{G}} \cdot \operatorname{tang} \delta$. Die Konstante G giebt die Stärke des Feldes an, welches im Zentrum der Rolle durch die Stromeinheit erzeugt wird.

209. Die Sinus-Bussole. Der Nachteil der soeben beschriebenen Tangentenbussole besteht in ihrer geringen Empfindlichkeit, da die Rolle im Vergleich zur Nadel notwendigerweise sehr gross ist und sich deshalb in grösserer Entfernung von derselben befindet. Ein Galvanometer mit einer kleinern Rolle oder einer grössern Nadel würde man als Tangentengalvanometer nicht gebrauchen können, obgleich seine Empfindlichkeit eine grössere sein würde. *Jedes* empfindliche Galvanometer, bei welchem die Nadel durch den Erdmagnetismus gerichtet wird, lässt sich jedoch als **Sinusbussole** gebrauchen, vorausgesetzt, dass der Rahmen, auf welchen die Drahtwindungen gewickelt sind, sich um eine durch den Mittelpunkt gehende Achse drehen lässt. Ist der Apparat in dieser Weise konstruiert, so wendet man folgende Methode der Strommessung an: die Rolle wird zunächst der Nadel (d. h. also dem magnetischen Meridiane) parallel gestellt; alsdann schickt man einen Strom

---

1) Aus den Artikeln 202 und 349 geht hervor, dass die praktische Einheit des Stromes, welche wir »ein Ampère« nennen, nur den zehnten Teil einer »absoluten« Einheit im Zentimeter-Gramm-Sekunden-System beträgt.

hindurch, welcher eine Ablenkung erzeugt; die Rolle selbst wird nun in demselben Sinne gedreht, bis dieselbe mit der Nadel wieder parallel steht. In dieser Lage wirken zwei Kräfte auf die Nadel, nämlich die richtende Kraft des Erdmagnetismus, welche in der Richtung des magnetischen Meridians wirkt, und dann diejenige Kraft, welche der durch die Rolle fliessende Strom ausübt, und welche die Pole der Nadel um einen rechten Winkel zu drehen strebt. In der That hat man hier ein Kräftepaar, welches genau dem Kräftepaar des Erdmagnetismus das Gleichgewicht hält. In der Vorlesung über die magnetischen Kraftgesetze (Art. 136) ergab sich nun, dass, wenn eine Nadel abgelenkt wird, das Moment des Kräftepaares dem Sinus des Ablenkungswinkels proportional ist. Wird deshalb bei der Sinusbussole die Rolle so weit gedreht, dass die Nadel ihr wieder parallel ist, so ist *die Stromstärke in der Rolle dem Sinus des Winkels proportional, um welchen die Rolle gedreht wurde* [1]).

210. Das Spiegel-Galvanometer. Ist ein Galvanometer von grosser Empfindlichkeit erforderlich, so müssen die beweglichen Teile sehr leicht und klein sein. Um die Bewegungen einer sehr kleinen Nadel zu übersehen, muss man einen *Zeiger* irgend welcher Art benutzen. In der That ist es beim Tangentengalvanometer üblich, an der kurzen, starken Nadel einen feinen, unbiegsamen Zeiger aus Aluminium zu befestigen. Eine weit bessere Methode besteht darin, an der Nadel einen sehr leichten Spiegel von mit Silber belegtem Glase anzubringen, mit

---

1) Wer die Stärke zweier Ströme vergleichen will, hat hier wieder eine Tafel der natürlichen Sinus nötig. Nehmen wir an, dass beim Strom C die Rolle um einen Winkel Θ gedreht werden muss, und bei einem zweiten Strome C′ um Θ', so ist:

$$C : C' = \sin \Theta : \sin \Theta'.$$

Es wird natürlich vorausgesetzt, dass der Apparat mit einer Skala versehen ist, auf welcher man den Winkel, um welchen die Rolle gedreht wurde, in Graden ablesen kann. Man kann hier auch in Fällen, wo es sich um blosse Näherungswerte handelt, den Kreis statt in Bogengrade in Teile teilen, welche gleichen Zunahmen des Sinus entsprechen.

Hilfe dessen ein Lichtstrahl nach einer Skala reflektiert werden kann, so dass die geringste Bewegung der Nadel vergrössert sichtbar gemacht wird. Die *Spiegelgalvanometer*, welche Kelvin zum Zwecke des Signalisierens durch unterseeische Kabel erfand, sind beachtenswerte Beispiele dieser Art Apparate. Fig. 115 zeigt die allgemeine Einrichtung dieses Apparates. Der

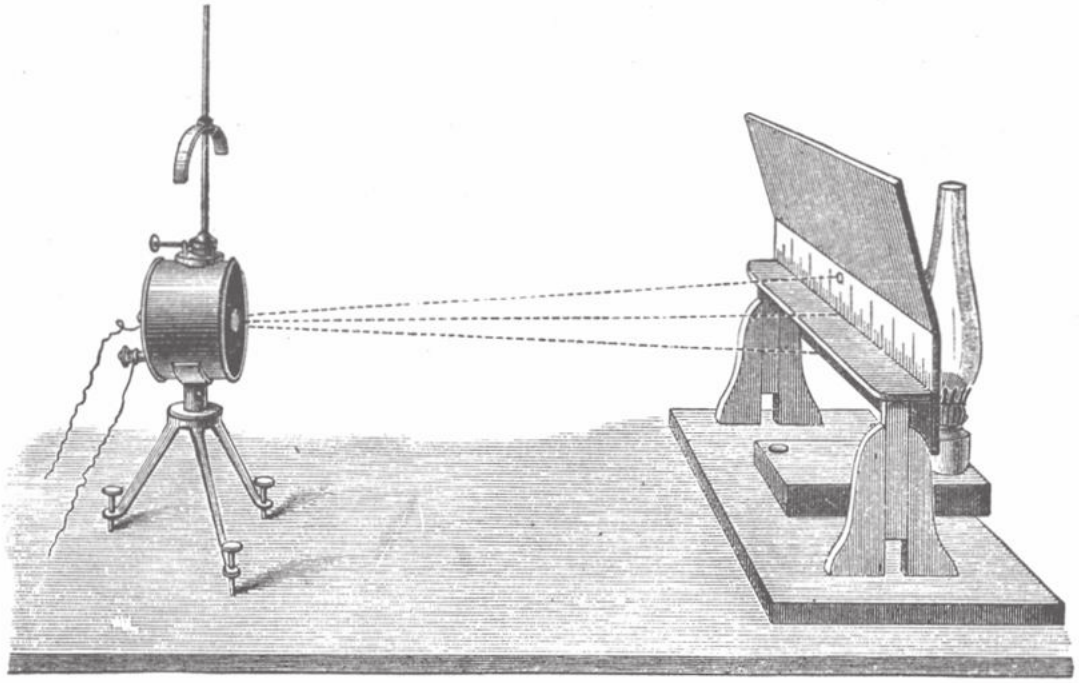


Fig. 115.

Hauptbestandteil des Galvanometers ruht auf drei Schraubenfüssen, durch welche derselbe senkrecht gestellt werden kann. Der Magnet besteht aus einer oder mehreren kleinen Stückchen einer Uhrfeder aus Stahl, welche auf der Rückseite eines leichten konkaven Glasspiegels von der ungefähren Grösse eines 10-Pfennig-Stücks befestigt sind. Dieser Spiegel hängt an einem einfachen Seidenkokonfaden innerhalb der Rolle, und ein gekrümmter Magnet, welcher dem Erdmagnetismus entgegenwirken oder die Nadel richten soll, wird an einer vertikalen Stütze oberhalb der Rolle befestigt. Eine weitere Abbildung des aufgehängten Spiegels und der Magnete zeigen Fig. 116 und 117. Dem Galvanometer gegenüber befindet sich die Skala. Ein Lichtstrahl von einer Petroleum-Lampe geht durch eine enge Oeffnung

unter der Skala und fällt auf den Spiegel, welcher ihn nach der Skala zurückwirft. Der Spiegel ist schwach konkav und liefert einen scharf begrenzten Lichtfleck, wenn die Skala um die Brennweite des Spiegels von diesem entfernt ist. Der *richtende* Magnet setzt den Experimentierenden in den Stand, den reflektierten Lichtfleck auf den Nullpunkt der Skala fallen zu lassen. Der schwächste durch das Galvanometer fliessende Strom hat zur Folge, dass der Lichtfleck nach links oder rechts verschoben wird. Der schwache Strom, welcher erzeugt wird, wenn man die Spitze einer Messingnadel und eine Stahlnadel (die durch Drähte mit den Enden des Galvanometers verbunden sind) in einen Tropfen Salzwasser taucht, verschiebt den Lichtfleck sogleich über die Skala. Bei Anwendung eines starken Kalklichtes lässt sich die Bewegung der Nadel 1000 Personen zu gleicher Zeit sichtbar machen. Für noch empfindlichere Arbeiten kann man ein astatisches Nadelpaar anwenden, bei welchem jede Nadel von einer besondern Rolle umgeben, und der Spiegel an einer der Nadeln befestigt ist. Fig. 117 zeigt ein Diagramm dieser Form, mit 2 Spulen, welche so gewickelt sind, dass der Strom in entgegengesetzter Richtung hindurchgeht. Hat der Apparat 4 Spulen, 2 vor und 2 hinter dem schwebenden Nadelpaar, und hat jede Spule ungefähr 3 Kilometer Draht von circa 0,025 mm Dicke, so lässt sich noch die Ablenkung eines Stromes sichtbar machen, welcher 50,000 Millionen mal schwächer ist als ein Ampère.

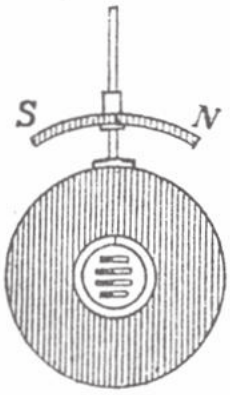


Fig. 116.

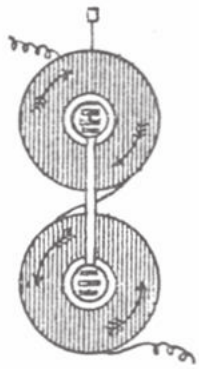


Fig. 117.

211. Galvanometer mit aufgehängter Rolle. Dieselben sind von Sturgeon (1836), Varley (1860) und andern benutzt worden, und ihr Prinzip findet sich auch bei Kelvin's Heberschreiber. Das bekannteste Galvanometer dieser Art ist das von D'Arsonval (Fig. 118). Zwischen den Polen eines zusammengesetzten permanenten Stahlmagnets von U-förmiger Gestalt

schwebt an einem sehr dünnen gewalzten Silberdrahte eine offene Rolle, deren Draht sehr dünn ist und auf ein leichtes Gestell von rechteckförmiger Gestalt gewickelt ist. Der Strom wird durch die Aufhängedrähte der Rolle zugeführt und wieder zurückgeführt. Innerhalb der aufgehängten Rolle befindet sich ein von hinten gestützter Cylinder aus weichem Eisen, der das magnetische Feld verstärkt. Die vertikalen Teile der Rolle hängen frei in den beiden engen Oeffnungen, wo das magnetische Feld sehr kräftig ist. Die Kraft, welche die Rolle zu drehen strebt, ist dem Strome, der Anzahl der Windungen und der Intensität des magnetischen Feldes proportional; folglich wird der Apparat sehr empfindlich, wenn man einen recht kräftigen Magnet benutzt. Die Elastizität des Aufhängedrahtes kontrolliert die Stellung der Rolle, und strebt sie in ihre ursprüngliche Lage zurückzuführen. Diese Galvanometer sind von dem erdmagnetischen Felde unabhängig, noch werden sie durch benachbarte Magnete beeinflusst, so dass man sie in vielen Fällen benutzen kann, wo andere Galvanometer unbrauchbar sind. Einige sind mit einem Index und einem Zifferblatt versehen, oder, was gebräuchlicher ist, sie tragen an der Rolle einen Spiegel, welcher einen Lichtstreifen reflektiert.

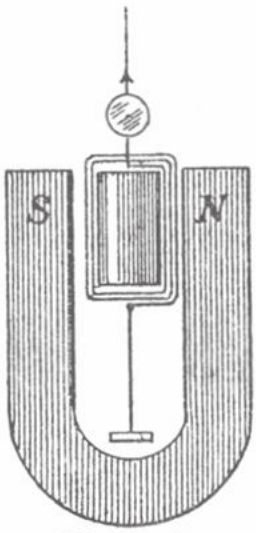


Fig. 118.

In jüngster Zeit haben Ayrton und Mather ein Galvanometer mit aufgehängter Rolle konstruiert (Fig. 119). Letztere wird hier aus einer länglichen Schlinge gebildet, welche an ihren Seiten keine Oeffnung hat. Folglich lassen sich die Magnetpole sehr nahe an einander bringen; dieselben sind aus einer Anzahl flacher Stahlmagnete von nahezu kreisförmiger Gestalt zusammengesetzt, welche über einander aufgeschichtet sind. Ein solcher Apparat, mit Spiegel und Skala

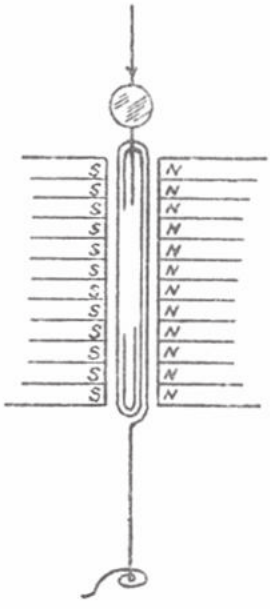


Fig. 119.

versehen, lässt noch die Ablenkung eines Grades erkennen, wenn der Strom 90,000,000 mal schwächer als 1 Ampère ist.

Starke Ströme darf man nicht durch sehr empfindliche Galvanometer schicken, denn wenn dieselben auch nicht verdorben werden, sind doch die Ablenkungen der Nadel zu gross, um eine genaue Messung zu gestatten. In diesem Falle gebraucht man ein *Nebengeleis*, d. h. die Drahtwickelung der Rolle wird so eingerichtet, dass der grössere Teil des Stromes an dem Galvanometer vorbeigeht und nur ein kleiner Teil des Stromes wirklich durch die Rolle des Apparats fliesst. Der Widerstand des Nebengeleises muss zum Widerstande des Apparates ein bekanntes Verhältnis haben, entsprechend dem in Art. 404 angeführten Satze über verzweigte Ströme.

212. Das Differential-Galvanometer. Zum Zwecke der Vergleichung zweier Ströme wird häufig ein Galvanometer angewendet, bei welchem die Rolle aus *zwei* getrennten Drähten besteht, welche neben einander aufgewickelt sind. Werden zwei gleiche Ströme in entgegengesetzten Richtungen durch diese Drähte gesandt, so bewegt sich die Nadel nicht. Sind die Ströme jedoch ungleich, so wird die Nadel durch den stärkern Strom abgelenkt, und zwar mit einer Kraft, welche der *Differenz* der Stärke beider Ströme entspricht.

213. Das ballistische Galvanometer. Um die Stärke von solchen Strömen zu messen, welche nur sehr kurze Zeit dauern, wendet man Galvanometer an, bei denen die Nadel eine verhältnissmässig grosse Schwingungsdauer hat. Dies ist der Fall bei langen oder schweren Nadeln; auch kann man die Nadeln mit Bleigewichten beschweren. Da die Nadel langsam schwingt, so summieren sich gleichsam die verschiedenen Impulse, welche der kurz dauernde Strom in den einzelnen Momenten ausübt. *Der Sinus des halben Winkels des ersten Ausschlages der Nadel ist der durch die Rolle geflossenen Elektrizitätsmenge proportional.* Auf diese Weise lässt sich die Ladung eines Kondensators messen, indem man denselben durch ein ballistisches Galvanometer entladet. (Art. 413).

214. Methoden der Dämpfung; aperiodische Galvanometer. Damit die Nadel nicht längere Zeit hin und her schwingt, benutzt man verschiedene Mittel, um die Bewegung zu *dämpfen,* nämlich:

1) Dämpfung durch die Luft. — Eine an der Nadel befestigte leichte Fahne stösst gegen die Luft und dämpft dadurch die Bewegung. Bei Spiegelapparaten dämpft der Spiegel selbst, besonders wenn derselbe von einem engen Gehäuse umgeben ist.

2) Dämpfung durch Oel. — Eine Fahne taucht in Oel.

3) Magnetische Dämpfung. — Schwingt die Nadel in der Nähe einer Kupferkugel oder innerhalb derselben, so kommt sie bald in Ruhe, infolge der im Kupfer induzierten Wirbelströme (vergl. Art. 452). Diese Ströme dämpfen die Bewegung der aufgehängten Rolle bei Instrumenten dieser Art.

Die Schwingungsperiode lässt sich dadurch reduzieren, dass man das Gewicht und die Hebelarmlänge der beweglichen Teile vermindert, so dass ihr Trägheitsmoment kleiner wird. Dasselbe lässt sich auch (auf Kosten der Empfindlichkeit des Apparates) durch Verstärkung der hemmenden Kräfte verringern. Ein Apparat, welcher so gedämpft wird, dass er zur Ruhe kommt, ohne eine periodische Schwingung vollführt zu haben, heisst ein *aperiodischer* Apparat.

215. Voltmeter oder Potentialgalvanometer. Verfertigt man ein Galvanometer mit einer Rolle von sehr langem, dünnen Drahte von grossem Widerstande, so fliesst nur ein ganz geringer Teil des Stromes hindurch; doch ist derselbe stets der Potentialdifferenz proportional, welche an den beiden Enden seines Schliessungsbogens auftritt. Ein derartiges Galvanometer, mit einer geeigneten Skala versehen, giebt die Anzahl der Volt zwischen seinen Enden an. Es giebt mancherlei Formen dieser Galvanometer; alle stimmen darin überein, dass sie eine Rolle von hohem Widerstande haben, bisweilen mehrere tausend Ohm. Das in Art. 211 beschriebene Galvanometer mit aufgehängter Rolle liefert ein vortreffliches Voltmeter. Weston's Voltmeter, welches in Amerika eine weite Verbreitung gefunden hat, ge-

hört dieser Klasse an; seine Rolle schwebt leicht auf einer Spitze und wird durch eine Spiralfeder gehemmt. Jedes empfindliche Spiegelgalvanometer lässt sich als Voltmeter verwenden, man braucht nur seinem Schliessungsbogen äusserlich einen genügend grossen Widerstand hinzuzufügen. Es giebt auch noch andere Voltmeter, welche auf elektrostatischen Wirkungen beruhen. Dieselben sind eine Art Elektrometer und sollen im Artikel 285 beschrieben werden. Cardew's Voltmeter ist von der obigen Art von Instrumenten verschieden, und besteht aus einem langen dünnen Platindrahte von hohem Widerstande, welcher sich beim Erwärmen ausdehnt, wenn derselbe quer mit einem Schliessungsbogen verbunden wird. Alle Voltmeter verwendet man als *Nebengeleise* quer zwischen den beiden Stellen, deren Potentialdifferenz gemessen werden soll. Dieselben werden niemals in den Schliessungsbogen einrangiert, wie dies bei Amperometern der Fall ist.

216. Amperometer. Ein Galvanometer, dessen Skala in der Weise graduiert ist, dass sein Index direkt die Zahl der durch die Rolle fliessenden Ampère angiebt, heisst ein *Amperometer*. Diese Instrumente wurden im Jahre 1879 von Ayrton und Perry zu praktischem Gebrauch eingeführt. In der Folgezeit sind noch viele andere Arten erfunden worden. Die Instrumente von Ayrton und Perry sind transportabel und aperiodisch, und die Nadel, welche die Gestalt eines Ovals hat (Fig. 120), befindet sich zwischen den Polen eines kräftigen permanenten Magnets, durch welchen ihre Richtung bestimmt wird, so dass sie unabhängig vom Erdmagnetismus ist. Infolge einer besondern Form der Polenden, der Nadel und der Rollen sind die Winkelablenkungen der Stärke des ablenkenden Stromes proportional. Diese Amperometer werden mit kurzen Rollen von sehr geringem Widerstande und weniger Drahtwindungen angefertigt. Ayrton

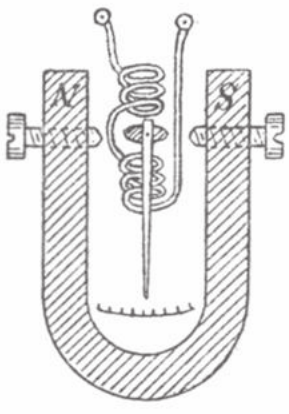


Fig. 120.

und Perry konstruierten auch Voltmeter von ähnlicher Form, jedoch mit langen Rollen von hohem Widerstande.

Unter den zahlreichen im Handel vorkommenden Formen von Amperometern giebt es auch solche, welche weder einen Magnet noch einen Eisenkern haben, und welche auf der Kraft beruhen, die eine feste und eine bewegliche, vom Strome durchflossene Rolle auf einander ausüben. Von ihnen wird in Art. 389 die Rede sein; dieselben eignen sich sowohl für Wechselströme wie für kontinuierliche. Zu dieser Art gehört Siemen's Elektrodynamometer, sowie Kelvin's Wagen.

Andere Apparate beruhen auf den magnetischen Eigenschaften des vom Strome beeinflussten Eisens. Hierzu gehören die Instrumente von Schuckert (Fig. 121). Ein auf der Achse einer offenen Rolle schwebender Zeiger trägt einen leichten Streifen aus weichem Eisen, dessen Querschnitt *B* ist. Ein zweiter Streifen *A* ist innerhalb der Rolle befestigt. Indem der Strom um die Rolle fliesst, magnetisiert er diese Streifen, und letztere stossen sich ab. Die hemmende Kraft ist hier die Schwerkraft.

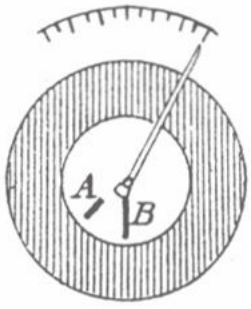


Fig. 121.

XVIII. VORLESUNG: *Von den durch Induktion erzeugten Strömen.*

217. Im Jahre 1831 machte Faraday die Entdeckung, dass in einem geschlossenen Stromleiter sich dadurch Ströme erregen lassen, dass man in seiner Nähe Magnete bewegt oder dass man den Stromleiter durch ein magnetisches Feld führt; und er vervollständigte diese Entdeckung noch, indem er feststellte, dass ein Strom von veränderlicher Stärke in einem geschlossenen in seiner Nähe befindlichen Stromleiter einen sekundären Strom induzieren kann. Solche Ströme, die durch Magnete oder andere Ströme erzeugt werden, heissen **Induktionsströme** und die Entstehung dieser induzierten Ströme durch einen Magnet oder einen Strom wird **elektromagnetische Induk-**

tion[1]) genannt. Auf diesem Prinzipe beruhen die modernen *Dynamomaschinen*, welche auf mechanischem Wege elektrische Ströme erzeugen, sowie die *Induktionsrollen*, die Wechselstrom-*Transformatoren* und andere Apparate.

218. Von den durch einen Magnet erzeugten Induktionsströmen. Wird eine Rolle aus isoliertem Drahte zu einem Stromkreise mit einem empfindlichen Galvanometer verbunden, und wird ein Magnet schnell in die Oeffnung der Rolle geschoben (wie in Fig. 122), so beobachtet man einen vorübergehenden Strom, welcher den Stromkreis durchfliesst, während der Magnet in die Rolle geschoben wird. So lange der Magnet ruhig in der Rolle steckt, induziert derselbe keine Ströme. Wird derselbe jedoch rasch aus der Rolle herausgezogen, so beobachtet man einen zweiten vorübergehenden Strom, welcher in einer dem ersten Strome entgegengesetzten Richtung fliesst. Der induzierte Strom, welcher durch das Hineinstecken des Magnets erzeugt wurde, ist ein *entgegengesetzt* gerichteter Strom, d. h. er fliesst in entgegengesetzter Richtung von demjenigen Strome, der den Magnet mit seiner vorhandenen Po-

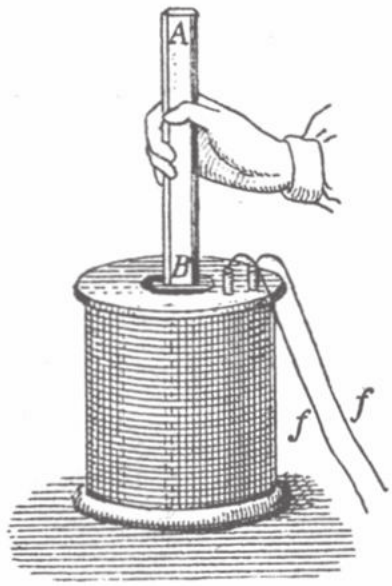


Fig. 122.

---

1) Der Leser darf diese elektromagnetische Induktion nicht mit der Erscheinung der elektrostatischen Induktion einer elektrischen Ladung durch eine andere Ladung (siehe Vorlesung III) verwechseln; letztere hat mit elektrischen Strömen nichts zu thun. In früheren Zeiten, als man von der Identität der von verschiedenen Quellen herrührenden Elektrizitäten (Art. 241) noch nichts wusste, wurde diejenige Elektrizität, welche der Bewegung von Magneten entsprang, Magneto-Elektrizität genannt. Für die meisten Zwecke sind die Ausdrücke magneto-elektrisch und elektromagnetisch gleichbedeutend. Die Erzeugung der Elektrizität durch Magnetismus und des Magnetismus durch Elektrizität sind in der That zwei verschiedene Operationen; doch sind beide in demjenigen Zweige der Wissenschaft enthalten, welcher Elektromagnetismus genannt wird.

larität erzeugen würde. Der induzierte Strom, der durch das Herausnehmen des Magnets veranlasst wurde, ist ein *gleich gerichteter* Strom.

Ob die Rolle nach dem Magnet hin bewegt wird, oder ob der Magnet nach der Rolle hin bewegt wird, ist für den Erfolg vollständig dasselbe. Je schneller die Bewegung vor sich geht, um so stärker sind die induzierten Ströme. Der Magnet wird bei diesem Gebrauche nicht schwächer, denn die wahre Quelle der erzeugten elektrischen Energie ist die bei der Bewegung verbrauchte mechanische Energie.

Ist der Schliessungsbogen nicht geschlossen, so entsteht kein Strom; doch ruft die relative Bewegung von Rolle und Magnet elektromotorische Kräfte ins Leben, welche Ströme zu erzeugen *bestrebt* sind. Faraday machte die weitere Entdeckung, dass diese Wirkungen mit dem magnetischen Felde, welches den Magnet umgiebt, im Zusammenhange stehen. Er zeigte, dass keine Wirkung erzielt wurde, wenn der Stromkreis die unsichtbaren magnetischen Linien des Magnets nicht durchschneidet.

219. Von den Induktionsströmen, welche durch Ströme erzeugt werden. Faraday führte auch den Nachweis, dass die Annäherung oder Entfernung eines Stromes in einem benachbarten geschlossenen Stromleiter einen Strom induzieren kann. Der hierher gehörige Versuch lässt sich zweckmässig mit dem Apparate Fig. 123. anstellen. Eine Rolle isolierten

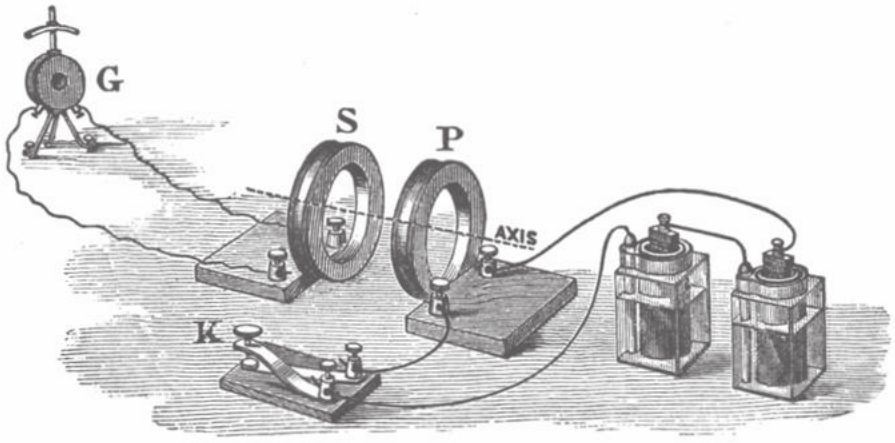


Fig. 123.

Drahtes *P* wird mit einer Batterie von 2 bis 3 Elementen zu einem Stromkreise verbunden, der sich mittelst eines Schlüssels *K* öffnen oder schliessen lässt. Eine zweite Rolle *S*, die mit

der ersten nicht in Verbindung steht, wird durch Drähte mit einem empfindlichen Galvanometer *G* verbunden. Wir wissen (Art. 197), dass eine Drahtrolle, in welcher ein Strom fliesst, wie ein Magnet wirkt. Es ergiebt sich, dass ein vorübergehender Strom in *S* induziert wird, wenn der Strom in *P* zirkuliert und dabei die Rolle plötzlich nach *S* hin bewegt wird. Wenn *P* schnell von *S* wegbewegt wird, so bemerkt man in dem zweiten Stromkreise einen neuen vorübergehenden Strom. Der erste dieser beiden vorübergehenden Ströme ist ein »entgegengesetzt gerichteter«, während der zweite ein »gleichgerichteter« ist (d. h. ein solcher, der um die Rolle *S* in derselben Richtung fliesst, wie der Batteriestrom in der Rolle *P*). Die Rolle *P* heisst die *primäre* Rolle und der in ihr fliessende Strom der *primäre* Strom. Die andere Rolle *S* heisst die *sekundäre* Rolle und die in ihr induzierten, vorübergehenden Ströme nennt man bisweilen Sekundärströme.

Stellt man nun *P* nahe an *S*, und drückt auf den Schlüssel *K*, um den primären Strom zirkulieren zu lassen, so bemerkt man, dass in dem Augenblicke, wo der Strom in *P* einströmt, in *S* ein vorübergehender inverser Strom entsteht. Das Entstehen des Stromes hat dieselbe Wirkung, als wenn die vom Strome durchflossene Rolle *P* schnell nach *S* bewegt wird. *Unterbricht* man den Batteriestrom, so lange die primäre Rolle dicht an der sekundären steht, so hat man dieselbe Wirkung, als wenn die primäre Rolle schnell wegbewegt wird. *Schliesst* man den Batteriestrom, so lange die primäre Rolle dicht an der sekundären steht, so hat man dieselbe Wirkung, als wenn die primäre Rolle schnell heran bewegt wird.

So lange ein konstanter Strom durch den primären Stromleiter geht, werden in dem sekundären Stromleiter keine Ströme induziert, vorausgesetzt, dass beide Stromleiter nicht in *relativer Bewegung* zu einander sind; ein Bewegen des sekundären Stromleiters gegen den primären hat jedoch dieselbe Wirkung, wie ein Bewegen des primären Stromleiters gegen den sekundären, und umgekehrt.

Wir können diese Resultate in folgender Tabelle veranschaulichen:

Durch einen	werden in dem sekundären Stromleiter vorübergehende *entgegengesetzt gerichtete* Ströme induziert	werden in dem sekundären Stromleiter vorübergehende *gleichgerichtete* Ströme induziert
Magnet	Bei der Annäherung	Bei der Entfernung
Strom	Bei der Annäherung oder beim Beginn oder bei wachsender Stromstärke.	Bei der Entfernung oder beim Aufhören oder bei abnehmender Stromstärke.

220. Fundamental-Gesetze über Induktion. Wenn wir berücksichtigen, dass jeder von einem Strome durchflossene Stromleiter ein besonderes magnetisches Feld hat, dessen Kraftlinien durch den Stromkreis führen (Art. 197 und 384), so erkennen wir, dass die im vorhergehenden Artikel angegebenen Thatsachen in folgende Fundamentalgesetze zusammengefasst werden können:

1) Eine Abnahme der Anzahl der Kraftlinien, welche durch einen Stromkreis führen, erzeugt in demselben einen Strom in der positiven Richtung (d. h. einen »gleich gerichteten« Strom); während eine Zunahme der Anzahl der Kraftlinien, welche durch den Stromkreis gehen, in demselben einen Strom in der negativen Richtung erzeugt (d. h. einen inversen Strom).

Hier nehmen wir an, dass die positive Richtung längs der Kraftlinien diejenige Richtung ist, nach welcher ein freier N.-Pol sich bewegen würde, und dass die positive Richtung im Stromleiter dieselbe Richtung ist, nach welcher der Strom fliessen muss, um die magnetische Flut zu vermehren. (Vergl. die Korkzieherregel, Art. 193).

2) Die gesamte induzierte elektromotorische Kraft, welche in einem geschlossenen Stromleiter thätig ist, ist der Abnahme der Anzahl von Kraftlinien proportional, welche durch den Stromkreis gehen.

Nehmen wir zunächst an, N_1 sei die Anzahl der Kraftlinien, welche durch den Stromkreis hindurchgehen und nach einem

sehr kurzen Zeitabschnitt t sei die Zahl gleich N_2 geworden, dann ist die gesamte induzierte elektromotorische Kraft

$$E = \frac{N_1 - N_2}{t}.$$

Nach dem Ohm'schen Gesetze ist $C = \frac{E}{R}$, folglich

$$C = \frac{N_1 - N_2}{R \cdot t}.$$

Ist $N_2 > N_1$, und findet eine Zunahme der Anzahl der Kraftlinien statt, so ist $N_1 - N_2$ eine negative Grösse, so dass C mit negativem Vorzeichen auftritt, ein Beweis, dass der Strom ein entgegengesetzt gerichteter ist. Eine Rolle mit 50 Drahtwindungen, welche 1000 Linien durchschneiden, leistet dasselbe, wie eine Rolle mit 5 Windungen, welche 10,000 Linien durchschneiden, oder mit einer Windung, welche 50,000 Linien durchschneidet.

Um eine E.M.K. gleich der eines einzigen Daniell'schen Elements zu induzieren, ist erforderlich, dass 110 Millionen Linien pro Sekunde durchschnitten werden. Da derartig grosse Zahlen unbequem sind, so hat man die Einheit der E.M.K., das Volt, dazu gewählt, um den Durchschnitt von 100 Millionen Linien pro Sekunde auszudrücken.

Beispiel. Angenommen, die Anzahl der magnetischen Linien nimmt in 0,02 Sekunden von 800,000 auf 0 ab, also um 40 Millionen pro Sekunde, dann beträgt die induzierte E.M.K. für jene Zeit 0,4 Volt.

Dies wichtige Gesetz können wir uns noch klarer machen, indem wir Fig. 124 betrachten. Nehmen wir an, ABCD sei ein Stromleiter, von welchem das Stück AB längs DA und CB nach S und T gleiten kann. Die vertikalen Pfeile mögen vertikale Kraftlinien in einem gleichmässigen magnetischen Felde darstellen und (wie bei den vertikalen Komponenten der Kraftlinien der Erde auf der nördlichen Halbkugel) die Richtung angeben, nach

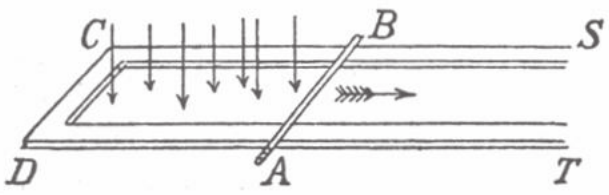


Fig. 124.

welcher sich ein N-Pol, falls derselbe frei wäre, bewegen würde. Die positive Richtung dieser Kraftlinien geht daher vertikal nach unten durch den Stromleiter. Wenn nun AB nach ST mit gleichförmiger Geschwindigkeit gleitet, so schneidet AB in jeder Sekunde eine bestimmte Anzahl von Kraftlinien, und in jeder Sekunde kommt eine gewisse Anzahl zu der totalen Summe der Kraftlinien hinzu, welche durch den Stromleiter gehen. Ist N_1 die Anzahl im Anfange, und N_2 diejenige am Ende eines Stromleiters, so ist $N_1 - N_2$ eine negative Grösse und in dem Stromkreise ist eine elektromotorische Kraft vorhanden, deren Richtung durch das gleitende Stück von A nach B geht. Es muss noch hervorgehoben werden, dass alle diese Induktionserscheinungen in Wirklichkeit magnetischer Natur sind. Bei dem Versuche mit den beiden Rollen P und S sind es die magnetischen Linien der Rolle P, welche bei ihrem Durchgange durch die Rolle S die induzierte E.M.K. ins Leben rufen. Dies lässt sich noch durch folgenden weitern Versuch beweisen. Man lege einen Eisenstab, ein Schüreisen oder noch besser ein Bündel von Eisendrähten in die Richtung der punktierten Linie, so dass seine Enden durch P und S hindurchgehen. Infolge seiner grossen magnetischen Permeabilität wird derselbe dazu beitragen, die magnetischen Linien von P durch S zu leiten und er wird in dieser Lage die Wirkung bedeutend verstärken. In der That, ist ein Eisenkern vorhanden, so sind, selbst wenn der Abstand zwischen P und S mehrere Zentimeter beträgt, die Induktionserscheinungen beim Schliessen und Oeffnen des Stromes ebenso stark, als wenn kein Eisenkern benutzt wird und P sich dicht bei S befindet.

221. Richtung der induzierten E.M.K. Der Bequemlichkeit halber hat man bestimmte Regeln aufgestellt, welche über die Richtungsverhältnisse zwischen dem Magnetismus, der Bewegung und der induzierten E.M.K. Aufschluss geben. Von diesen Regeln

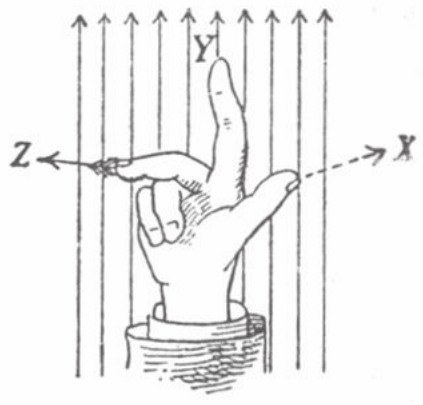


Fig. 125.

ist die Fleming'sche am bekanntesten: *Man halte den Zeigefinger der rechten Hand* (Fig. 125) *in die Richtung der magnetischen Linien und den Daumen in die Richtung der Bewegung: hält man dann den Mittelfinger rechtwinklig sowohl zum Daumen als zum Zeigefinger, so giebt derselbe die Richtung der induzierten E.M.K. an.*

Eine andere oft gebrauchte Regel ist ein Seitenstück zu der von Ampère: *Man denke sich in einem Konduktor eine Figur derart schwimmend, dass sie nach der positiven Richtung der Linien sieht. Wird dann der Konduktor und die Figur nach rechts bewegt, so schwimmt letztere mit dem durch diese Bewegung induzierten Strome;* wird die Figur nach ihrer Linken bewegt, so ist der Strom gegen sie gerichtet.

222. Faraday's Scheibenmaschine. Faraday konstruierte verschiedene magneto-elektrische Maschinen. Eine derselben besteht aus einer Kupferscheibe (Fig. 126), welche zwischen den Polen eines Stahlmagnets rotiert. Der Strom fliesst von der Achse zum Rande oder umgekehrt, je nach der Drehungsrichtung. Derselbe wird durch Drähte mit Gleitkontakten weiter geführt. Bei andern Maschinen werden Rollen aus Kupferdraht derart gewickelt, dass magnetische Linien durchschnitten werden. Dasselbe Prinzip der Induktion wird bei den modernen *Dynamo-elektrischen Maschinen* verwendet (Vorl. 42). In jedem Falle wird Kraft gebraucht, um die Bewegung zu erzeugen. Es sind durchweg Vorrichtungen, um mechanische Energie in elektrische Energie umzusetzen.

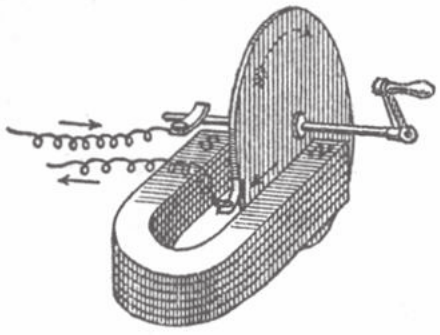


Fig. 126.

223. Faraday's Ring; Prinzip der Transformation. Einer der ersten Versuche Faraday's war folgender: Er wickelte auf einen eisernen Ring von ungefähr 20 cm Durchmesser (Fig. 127) zwei isolierte Drähte P und S, und verband P mit einem Batteriestrome, S mit einem Galvanometer. Jedesmal,

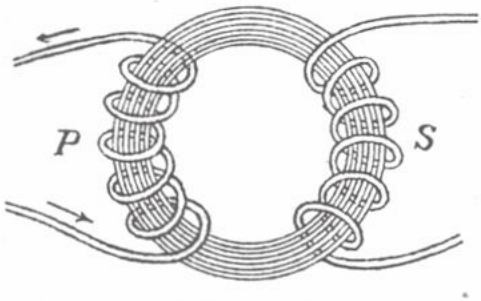


Fig. 127.

wo der in *P* fliessende Strom geschlossen oder unterbrochen wurde, entstanden in *S* Sekundärströme. In der That, die in *P* fliessenden Ströme magnetisieren den eisernen Ring und die durch *P* erzeugten magnetischen Linien gehen durch *S* und rufen hier Induktionsströme ins Leben. Wird *S* als primäre Rolle benutzt, so wirkt *P* als sekundäre: die Induktion zwischen *P* und *S* ist eine *gegenseitige*. Der Faraday'sche Ring mit seinen beiden auf einen geschlossenen eisernen Kreis gewundenen Rollen kann als der eigentliche Typus aller *Transformatoren* oder *Induktionsrollen* betrachtet werden. Faraday benutzte auch einige Induktionsrollen, bei denen die beiden Rollen *A* und *B* (Fig. 128) über einander um einen geraden cylinderförmigen Eisenkern *C* gewickelt waren.

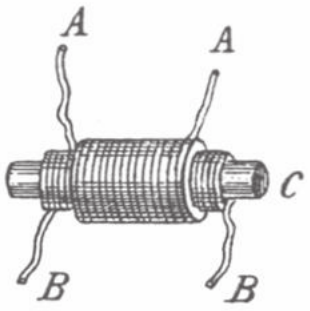


Fig. 128.

Bei allen Transformatoren verhalten sich die elektromotorischen Kräfte, welche in der Sekundärrolle erzeugt werden, zu den im primären Schliessungsbogen benutzten, nahezu wie die Zahl der Windungen der beiden Rollen. Hat z. B. die primäre Rolle 100 Windungen und die sekundäre 2500, so ist die E.M.K. in dem sekundären Schliessungsbogen nahezu 25mal grösser als die des primären. Durch geeignete Wahl der Anzahl der Windungen, lässt sich die E.M.K. nach oben oder nach unten transformieren.

224. Die Induktionsrolle. Um enorm hohe elektromotorische Kräfte zu erzeugen, welche Funken durch grosse Zwischenräume senden können, was gewöhnliche Batterieen, falls sie unter 100 Volt haben, unmöglich leisten können, benutzt man mit Vorteil das Prinzip der Transformation. Um solche Funkenentladungen zu erzeugen, bedient man sich des in Fig. 129 abgebildeten Instruments, welches von Callan, Sturgeon, Ruhmkorff und Andern vervollkommnet worden ist. Dieses Instrument heisst der **Induktionsapparat** oder das **Induktorium**. Der Induktionsapparat besteht aus einer zylinderförmigen Spule, welche einen zentralen Eisenkern umschliesst. Diesen Eisenkern umgeben eine

kurze, innere oder »primäre« Rolle aus dickem Drahte und eine äussere »sekundäre« Rolle, welche aus mehreren tausend Windungen eines sehr feinen, in seinen einzelnen Teilen sehr sorgfältig isolierten Drahtes besteht. Der primäre Stromleiter wird mit den Polenden einer aus mehreren kräftigen Grove'schen oder Bunsen'schen Elementen bestehenden Batterie verbunden, und

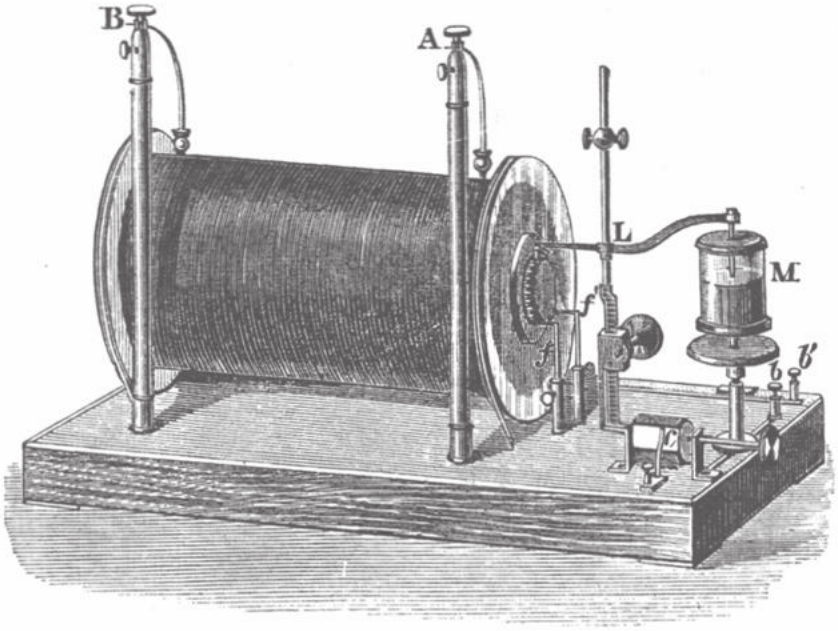


Fig. 129.

ausserdem werden noch ein Unterbrecher und ein Kommutator oder Schlüssel eingeschaltet. Der Unterbrecher hat den Zweck, den Strom der primären Rolle in rascher Aufeinanderfolge zu unterbrechen und wieder zu schliessen. Dies hat zur Folge, dass jedesmal, wenn der Stromleiter geschlossen wird, in der äussern »sekundären« Spirale ein momentaner entgegengesetzt gerichteter Strom induziert wird, und jedesmal, wenn der Strom unterbrochen wird, ein kräftiger momentaner gleich gerichteter Strom. Da die Anzahl der magnetischen Linien, welche bei jedem Schliessen resp. Unterbrechen erzeugt resp. vernichtet werden, dieselbe ist, so sind die beiden elektromotorischen Impulse einander gleich; bei Anwendung eines Kondensators hat jedoch der Strom beim Schliessen einen bedeutenden Bruchteil von Zeit zum Anwachsen nötig, während er beim Unterbrechen sofort aufhört. Im Verhältnis werden daher beim Unterbrechen viel mehr magnetische Linien durchschnitten als beim Schliessen.

Die induzierten elektromotorischen Kräfte dauern länger beim Schliessen, sind jedoch schwächer und sind zum Funkenstrom nicht genügend. Die beim »Unterbrechen« induzierten Ströme treten als glänzender Funkenstrom zwischen den einander genäherten Enden der sekundären Rolle auf. Die primäre Rolle wird aus starkem Drahte verfertigt, um starke magnetisierende Ströme leiten zu können, und besteht aus wenigen Windungen, damit der Widerstand nicht zu gross wird und damit eine Selbst-Induktion des primären Stromes auf sich selbst vermieden wird. Der zentrale Eisenkern hat den Zweck, durch seine grosse magnetische Permeabilität die Anzahl der Kraftlinien zu vermehren, welche durch die Rollen gehen; er besteht gewöhnlich aus einem Bündel dünner, von einander isolierter Drähte, um die Induktionsströme zu vermeiden, welche in demselben zirkulieren würden, wenn derselbe ein solider Stab wäre, und welche die Schnelligkeit seiner Magnetisierung oder Entmagnetisierung verlangsamen würden. Die sekundäre Rolle besteht aus vielen Windungen, um den Koeffizienten der gegenseitigen Induktion zu vergrössern; und da die elektromotorische Kraft der induzierten Ströme Tausende von Volt beträgt, so ist ihr Widerstand von keiner Bedeutung, und man kann dieselbe aus dem dünnsten Drahte verfertigen, der sich noch bequem winden lässt. Bei Spottiswoode's Riesen-Induktionsapparate (welcher einen Funken von über 1 Meter Länge in der Luft liefert, wenn 30 Grove'sche Elemente wirken), enthält die sekundäre Spirale einen 280 Meilen langen Draht von 340,000 Windungen, und bieten einen Widerstand von mehr als 100,000 Ohm.

Die Unterbrecher der Induktionsspiralen sind gewöhnlich sogenannte selbstthätige. Der Foucault'sche Unterbrecher, welcher in Fig. 128 mitabgebildet ist, besteht aus einem Messingarme L, welcher einen in eine Quecksilberschale M tauchenden Platindraht trägt. Jedesmal wenn der Eisenkern der Rolle magnetisiert wird, zieht derselbe ein Stück Eisen am Ende des Armes L an, und dadurch wird der Platindraht aus dem Quecksilber gezogen und der Strom dann unterbrochen. Durch eine Feder wird der

Arm wieder in die ursprüngliche Lage zurückgezogen, nachdem der Eisenkern beim Oeffnen des Stromleiters seinen Magnetismus wieder verloren hat. Bei kleinen Rollen besteht der Unterbrecher gewöhnlich aus einem dünnen Stahlstabe, welcher eine Platinspitze berührt und der beim Durchgange des Stromes durch die Anziehung des Eisenkernes zurückgezogen wird. Auf diese Weise schliesst und unterbricht er den Stromleiter, indem er wie der Hammer einer gewöhnlichen elektrischen Glocke hin und her schwingt.

Mit der primären Rolle ist gewöhnlich ein kleiner *Kondensator* verbunden, welcher aus Zinnfolie und paraffiniertem Papier besteht, die abwechselnd über einander geschichtet sind. In diesen Kondensator fliesst der Strom jedesmal ab, wenn der Stromleiter unterbrochen wird. Der Kondensator hat den Zweck, den entgegengesetzt gerichteten Strom beim Schliessen zu unterdrücken und die direkte E.M.K beim Unterbrechen zu verstärken. Die Funken sind länger und nehmen bloss einen Weg. Der Kondensator bewirkt dies durch seine als elektrische *Resonanz* bekannte Wirkung (vergl. Art. 512).

225. Ruhmkorff's Kommutator. Um den Batterie-Strom nach Belieben unterbrechen oder seine Richtung umkehren zu

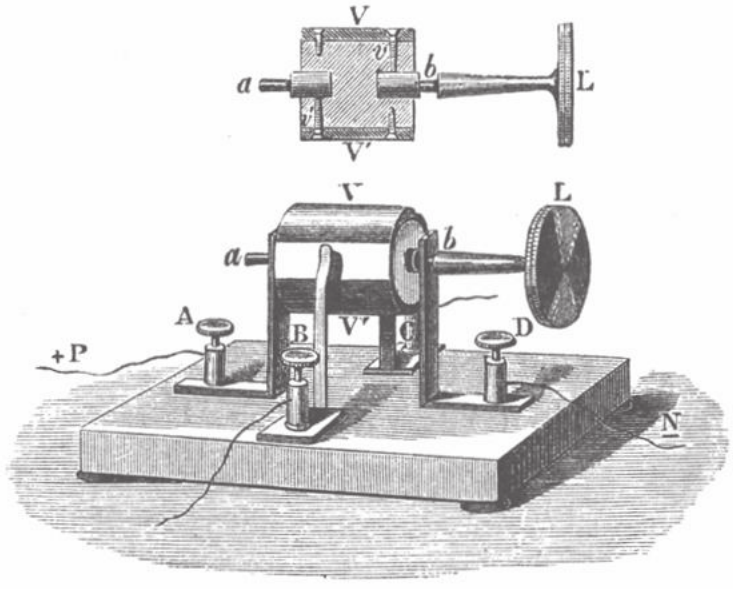


Fig. 130.

können, konstruierte Ruhmkorff den in Fig. 130 abgebildeten

Kommutator oder Stromwender. Bei diesem Apparate sind die Batteriepole durch die Enden der Achse eines kleinen Zylinders von Elfenbein oder Ebenholz mit zwei Metallblättern V und V' verbunden, welche so gedreht werden können, dass sie mit 2 vertikalen Federn B und C in Berührung kommen, welche mit den Enden der primären Rolle in Verbindung stehen. Es giebt noch zahlreiche andere Formen des Kommutators; eine derselben, welche als Schlüssel in der Telegraphie häufig verwendet wird, ist in Art. 493 abgebildet.

226. Lichtwirkungen des Induktions-Funken. Das Induktorium liefert eine rasche Aufeinanderfolge von Funken, an denen alle Wirkungen der Funkenentladung studiert werden können. Diese Funken unterscheiden sich bloss graduell von den Funken der Reibungselektrisiermaschine oder der Leydener Flasche. (Vergl. Vorl. 24: die Erscheinungen der Entladung).

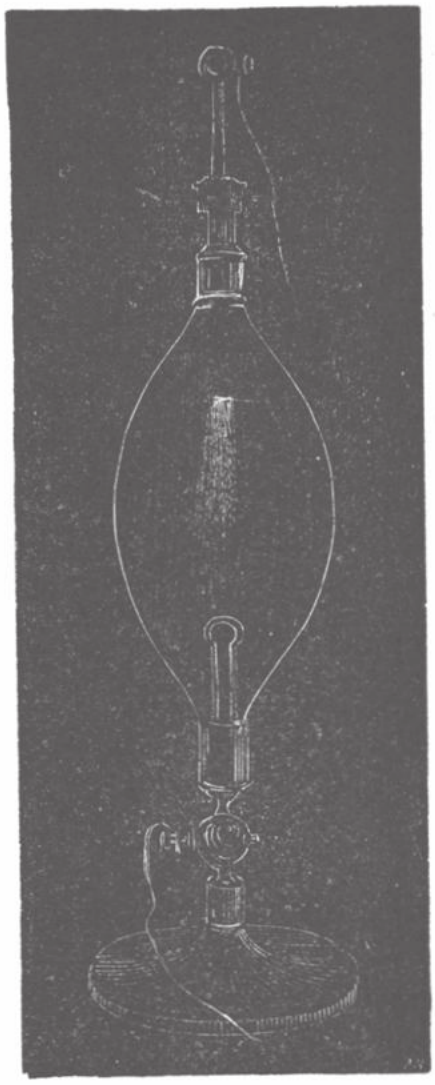


Fig. 131.

Einen grossen Nutzen gewährt das Induktorium bei der Untersuchung einer Entladung durch Glasgefässe oder Röhren, welche mit verdünnter Luft erfüllt sind. Fig. 131 veranschaulicht einen der zahlreichen schönen Versuche, wo der Funke sich in dem verdünnten Gase zu glänzenden Lichtflächen ausdehnt, und »Streifen« und andere komplizierte Erscheinungen auftreten.

227. Induktionsströme, welche durch den Erdmagnetismus erzeugt werden. Es ist nicht schwierig, vom Erdmagnetismus induzierte Ströme zu erhalten. Eine Rolle aus dünnem Drahte, welche mit einem empfindlichen Galvanometer in Verbindung steht,

durchschneidet beim raschen Umkehren die Kraftlinien des Erdmagnetismus und wird infolge dessen von einem Strome durchflossen.

Faraday benutzte in der That diese Methode, um die Richtung und Anzahl der Kraftlinien zu bestimmen. Wird eine kurze Spirale mit einem empfindlichen Galvanometer zu einem Stromkreise verbunden, welches eine schwere Nadel von grosser Schwingungsdauer hat, und wird die kurze Spirale, welche sich in einem magnetischen Felde befindet, plötzlich um 180° gedreht, so durchschneidet sie alle Kraftlinien, welche durch ihre eigene Fläche hindurchgehen, zweimal und der sinus des halben Winkels der ersten Schwingung (vergl. Art. 413) ist der Anzahl der geschnittenen Kraftlinien proportional; denn bei einer langsam schwingenden Nadel ist die gesamte Elektrizitätsmenge, welche durch die Rollen fliesst, gleich der Summe aller einzelnen Mengen, welche die starken oder schwachen induzierten Ströme liefern, die während des schnellen Prozesses des Schneidens der Kraftlinien im Stromleiter fliessen; und die kleine Spirale wirkt daher als eine *magnetische Versuchs-Platte.*

Wird der Stromleiter parallel mit sich selbst durch ein gleichförmiges magnetisches Feld bewegt, so treten keine Induktionsströme auf, denn es werden genau so viel Kraftlinien bei der Bewegung nach der einen Seite durchschnitten, als auf der andern Seite zurückbleiben. Ebenso entsteht kein Strom, wenn ein Draht parallel mit sich selbst einer Kraftlinie entlang geführt wird; auch wirkt keine mechanische Kraft auf den Draht, wenn er neben einer solchen Linie liegt und ein Strom durch denselben geschickt wird.

228. Erdströme. Die in Vorl. 12 erwähnten Schwankungen des Erdmagnetismus ändern die Anzahl der Kraftlinien, welche durch die Telegraphendrähte führen, und induzieren also in ihnen Störungen, welche unter dem Namen von »Erdströmen« bekannt sind. Zur Zeit eines magnetischen Sturmes haben die Erdströme in den brittischen Telegraphendrähten, wie nachgewiesen ist, eine Stärke von 40 Milli-Ampère erreicht, ein Strom, der die gewöhnlichen Arbeitsströme an Stärke übertrifft. Schwache

Erdströme werden täglich beobachtet und sind ihrem Charakter nach mehr oder weniger periodisch.

XIX. VORLESUNG: *Chemische Wirkungen des Stromes.*

229. Leitungsfähigkeit der flüssigen Körper. Ausser den chemischen Wirkungen innerhalb der Elemente einer Batterie, welche stets die Stromerzeugung begleiten, giebt es noch chemische Wirkungen, welche ausserhalb der Batterie vor sich gehen, wenn der Strom durch gewisse Flüssigkeiten geschickt wird. Die Flüssigkeiten lassen sich in 3 Klassen einteilen: 1) *diejenigen, welche überhaupt nicht leiten,* wie z. B. Terpentin und viele Oele, besonders Petroleum; 2) *diejenigen, welche leiten, ohne dabei zersetzt zu werden,* wie Quecksilber und andere geschmolzene Metalle, welche ebenso leiten, wie feste Metalle; 3) *diejenigen, welche zersetzt werden, wenn sie einen Strom leiten,* nämlich die verdünnten Säuren, Lösungen von metallischen Salzen, und gewisse geschmolzene Verbindungen fester Körper.

230. Zersetzung des Wassers. Im Jahre 1800 machten Carlisle und Nicholson die Entdeckung, dass sich der Volta'sche Strom durch Wasser leiten lässt und dass derselbe bei seinem Durchgange einen Teil der Flüssigkeit in ihre gasförmigen Bestandteile zerlegt. Diese Gase erschienen als Blasen an den Enden der Drähte, welche den Strom in die Flüssigkeit und aus derselben heraus leiteten; und zwar erschienen *Sauerstoffgas*blasen an der Stelle, wo der Strom in die Flüssigkeit eintrat, und *Wasserstoffgas*blasen dort, wo derselbe die Flüssigkeit verliess. Es stellte sich alsbald heraus, dass eine grosse Zahl anderer Flüssigkeiten, besonders verdünnte Säuren und Lösungen metallischer Salze, auf ähnliche Weise zersetzt werden konnten, wenn man einen Strom durch dieselben sandte.

231. Elektrolyse. Diesem Zersetzungsprozesse einer Flüssigkeit mit Hilfe eines elektrischen Stromes gab Faraday den Namen **Elektrolyse** (d. h. elektrische Analyse); und diejenigen

Körper, welche auf diese Weise zersetzt oder elektroanalysiert werden können, nannte er **Elektrolyte.**

Die Drahtenden, welche nach und von der Batterie führen, heissen **Elektroden**; zur Unterscheidung nennt man das Ende, durch welches der Strom eintritt, die **Anode**, und das, an welchem er austritt, die **Kathode.** Das Gefäss, in welchem sich eine zu zersetzende Flüssigkeit befindet, heisst eine *elektrolytische Zelle.*

232. Die Elektrolyse des Wassers. Um auf die Zersetzung des Wassers zurückzukommen, so können wir zunächst bemerken, dass vollkommen reines Wasser nicht zu leiten scheint, doch wird sein Widerstand durch Beimischung einiger Tropfen Schwefelsäure oder Salzsäure sehr verkleinert. Der in Fig. 132

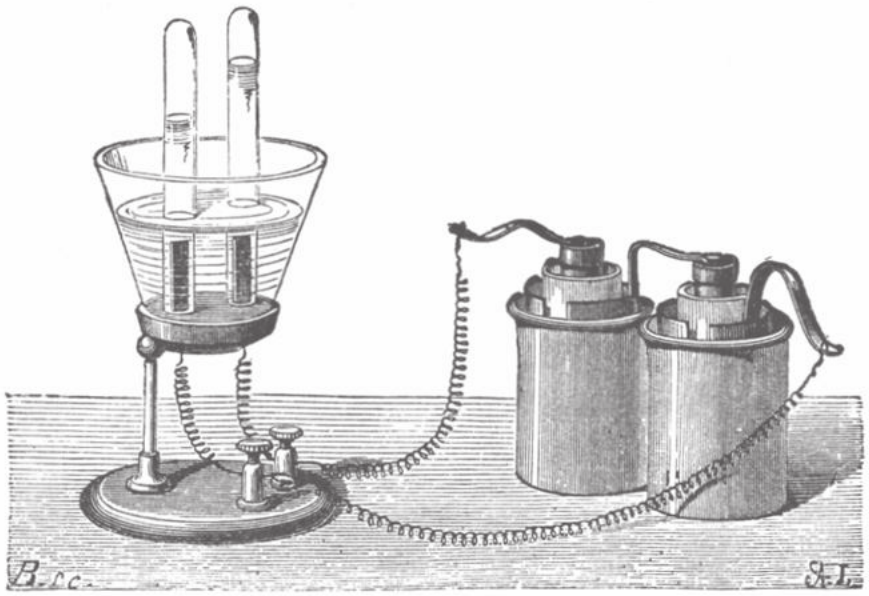


Fig. 132.

veranschaulichte Apparat ist für diesen Zweck geeignet. Die Pole einer Batterie von 2 Elementen (die in der Figur sind Bunsen'sche) stehen mit 2 aus Streifen von Platinblech bestehenden Elektroden in Verbindung, welche in ein mit angesäuertem Wasser gefülltes Gefäss führen. Zwei an ihrem einen Ende geschlossene Röhren, welche vorher mit Wasser angefüllt und dann umgekehrt wurden, nehmen die an den Elektroden entwickelten Gase auf. Platin ist andern Metallen, wie Kupfer oder Eisen, als Elektrode vorzuziehen, da es weniger leicht oxydiert und jeder Säure wider-

steht. Man findet, dass sich an der Kathode fast genau zweimal so viel Wasserstoffgas (dem Volumen nach) bildet, als Sauerstoff an der Anode. Diese Thatsache stimmt mit der bekannten chemischen Zusammensetzung des Wassers überein, welches durch Verbindung dieser beiden Gase im Verhältnis von zwei Volumenteilen des erstern mit einem des letztern entsteht. Die Volumina der entwickelten Gase verhalten sich jedoch nicht genau wie 2 zu 1, denn einmal wird ein kleiner Teil des Wasserstoffes von der Oberfläche des Platins absorbiert oder »okkludiert«, während ein beträchtlicher Teil des Sauerstoffes — ungefähr 1 Prozent — in der dichteren allotropischen Form des *Ozons* ausgeschieden wird, welches weniger Raum einnimmt und im Wasser auch etwas löslich ist. Ist eine hinreichende Menge der Gase entwickelt und angesammelt, so können dieselben untersucht werden; der Wasserstoff dadurch, dass man seine Brennbarkeit zeigt, der Sauerstoff dadurch, dass man durch denselben einen glimmenden Holzspan zur Flamme entfacht. Werden beide Gase in einer und derselben Röhre aufgefangen, so ergiebt sich, dass das Gasgemisch die wohlbekannte Explosiv-Eigenschaft des Knallgases hat. Die chemische Zersetzung wird durch folgende Gleichung ausgedrückt:

$$H_2O \quad = \quad H_2 \quad + \quad O$$

Wasser giebt 2 Vol. Wasserstoff und 1 Vol. Sauerstoff.

233. Elektrolyse des schwefelsauren Kupferoxyds. Als zweites Beispiel wollen wir die Elektrolyse einer Lösung des bekannten blauen Vitriols oder des schwefelsauren Kupferoxyds betrachten. Werden einige Krystalle dieses Körpers im Wasser aufgelöst, so erhält man eine blaue Flüssigkeit, welche durch den Strom eines einzigen Elements einer gewöhnlichen Batterie zwischen 2 Elektroden von Platinblech ohne Schwierigkeit elektroanalysiert werden kann. Die chemische Formel für schwefelsaures Kupferoxyd ist $CuSO_4$. Das Resultat der Elektrolyse ist die Zersetzung desselben in metallisches Kupfer, welches die Kathode als feine Schicht überzieht, und in das Radikal der Schwefelsäure, ein leicht zersetzbares Gemisch aus Schwefel

und Sauerstoff, auf welches sofort das Wasser reagiert und mit ihm Schwefelsäure und Sauerstoff bildet. Dieser Sauerstoff wird in Gestalt von Blasen an der Anode frei. Die chemischen Veränderungen lassen sich folgendermassen ausdrücken:

$$\underset{\text{Schwefelsaures Kupferoxyd}}{CuSO_4} = \underset{\text{Kupfer und}}{Cu} + \underset{\text{Schwefelsäureradikal}}{SO_4}$$

$$\underset{\text{Schwefelsäureradikal und}}{SO_4} + \underset{\text{Wasser}}{H_2O} = \underset{\text{Schwefelsäure und}}{H_2SO_4} + \underset{\text{Sauerstoff.}}{O}$$

Auf diese Weise wird, solange der Strom fliesst, der Flüssigkeit beständig Kupfer entzogen und an der Kathode abgesetzt und die Flüssigkeit wird immer mehr zur Säure. Beim Gebrauche kupferner Elektroden statt solcher von Platin, wird kein Sauerstoff an der Anode ausgeschieden, dagegen löst sich die Kupferanode selbst in der Flüssigkeit auf, und zwar in genau demselben Verhältnis, in welchem das Kupfer der Flüssigkeit an der Kathode abgesetzt wird.

234. Anion und Kathion. Die Atome, welche auf diese Weise von einander geschieden und von dem Strome unmerkbar nach den Elektroden geführt und dort abgesetzt werden, sind offenbar zweierlei Art: die einen gehen zur Anode, die andern zu der Kathode. Faraday nannte die wandernden Atome **Jonen**, und unterschied zwischen **Anion**, welches zur Anode, und **Kathion**, welches zur Kathode geht. Das Anion betrachtet man bisweilen als »elektronegativ«, weil es sich so bewegt, als ob es vom + Pol der Batterie angezogen würde, während das Kathion dann als »elektropositiv« angesehen wird. Wasserstoff und die Metalle sind Kathionen, da sie sich scheinbar *mit* dem Strome bewegen, und da abgesetzt werden, wo derselbe die elektrolytische Zelle verlässt. Zu den Anionen gehören Sauerstoff, Chlor etc. Wenn z. B. Chlorzink elektrolysiert wird, so wird das metallische Zink an der Kathode abgesetzt, während sich an der Anode Chlorgas entwickelt.

235. Quantitative Gesetze der Elektrolyse.

1) *Die Grösse der chemischen Wirkung ist in allen Punkten eines Schliessungsbogens gleich gross.* Werden zwei oder mehr

elektrolytische Becher an verschiedenen Punkten eines Schliessungsbogens angebracht, so ist die Grösse der chemischen Wirkung überall dieselbe, denn dieselbe Elektrizitätsmenge fliesst in derselben Zeit durch jeden Punkt des Schliessungsbogens. Enthalten alle diese Becher angesäuertes Wasser, so wird z. B. in jedem dieselbe Menge Wasserstoff frei, oder enthalten sie eine Lösung von schwefelsaurem Kupferoxyd, so werden in allen gleiche Quantitäten Kupfer abgesetzt. Enthalten einige der Becher angesäuertes Wasser, andere schwefelsaures Kupferoxyd, so sind die Gewichte des Wasserstoffs uud des Kupfers nicht *gleich*, verhalten sich jedoch wie ihre chemischen *Aequivalente.*

2) *Die Menge eines Jon, welche an einer Elektrode in einer bestimmten Zeit ausgeschieden wird, ist der Stromstärke proportional.* Ein Strom von 2 *Ampère* erzeugt genau eine doppelt so grosse chemische Zersetzung, wie in gleicher Zeit ein Strom von 1 *Ampère.*

3) *Die Menge eines Jon, welches in einer Sekunde an einer Elektrode ausgeschieden wird, ist gleich der Stromstärke, multipliziert mit dem »elektrochemischen Aequivalente« des Jon.* Durch den Versuch hat man gefunden, dass der Durchgang eines *Coulomb* Elektrizität durch Wasser 0,000010384 g Wasserstoff frei macht. Folglich macht ein Strom, dessen Stärke = C (Ampère), pro Sekunde C × 0,000010384 g Wasserstoff frei. Die Grösse 0,000010384 heisst das *elektro-chemische Aequivalent* des Wasserstoffs. Die »elektro-chemischen Aequivalente« anderer Elemente lassen sich leicht berechnen, wenn ihr chemisches »Aequivalent« bekannt ist. So ist z. B. das chemische Aequivalent[1]) des

1) Das chemische »Aequivalent« ist nicht mit dem »Atomgewichte« zu verwechseln. Das Atomgewicht des Kupfers ist 63, d. h. seine Atome sind 63 mal so schwer, als die Atome des Wasserstoffs. Aber in chemischen Verbindungen ersetzt ein Atom Kupfer 2 Atome Wasserstoff, oder ist »gleichwertig« mit ihnen; folglich beträgt das Gewicht des Kupfers, welches einem Atom Wasserstoff »äquivalent« ist, $\frac{63}{2} = 31\frac{1}{2}$. In allen Fällen ist das chemische »Aequivalent« gleich dem Quotienten $\frac{\text{Atomgewicht}}{\text{Wertigkeit}}$. Die obige Tabelle giebt hierüber hinreichend Aufklärung.

Kupfers = 31,59; multipliziert man dies mit 0,000010384, so ergiebt sich für das elektro-chemische Aequivalent des Kupfers der Wert 0,0003281 g.

Tabelle der elektrochemischen Aequivalente etc.

	Atomgewicht.	Wertigkeit.	Chemisches Aequivalent.	Elektrochemisches Aequivalent (Gramm pro Coulomb).
Elektropositive Körper:				
Wasserstoff	1	1	1	0,000010384
Kalium	39,03	1	39,03	0,0004053
Natrium	23	1	23	0,0002388
Gold	196,2	3	65,4	0,0006791
Silber	107,67	1	107,67	0,0011181
Kupfer	63,18	2	31,59	0,0003281
Quecksilber	199,8	2	99,9	0,0010374
Zinn	117,8	2	58,9	0,0006116
Eisen	55,9	2	27,95	0,0002902
Nickel	58,6	2	29,3	0,0003043
Zink	64,9	2	32,45	0,00033698
Blei	206,4	2	103,2	0,0010716
Elektronegative Körper;				
Sauerstoff	15,96	2	7,98	0,00008286
Chlor	35,37	1	35,37	0,0003673
Jod	126,54	1	126,54	0,0013140
Brom	79,76	1	79,76	0,0008282
Stickstoff	14,01	3	4,67	0,00004849

236. Die folgende Gleichung drückt die Regel aus, nach welcher man das Gewicht eines gegebenen Jon findet, welches aus einer elektrolytischen Lösung während einer bekannten Zeit durch einen Strom von bekannter Stärke ausgeschieden wird. Bedeutet C die (nach Ampère gerechnete) Stromstärke, t die

Zeit (in Sekunden), z das elektrochemische Aequivalent und w das (in Grammen ausgedrückte) Gewicht des frei gewordenen Elements, so ist

$$w = z \,.\, C \,.\, t$$

oder in Worten: *Das Gewicht eines durch Elektrolyse ausgeschiedenen Elements wird gefunden, wenn man sein elektrochemisches Aequivalent mit der Stromstärke und der Zeit, während welcher der Strom fliesst, multipliziert.*

Beispiel. Ein Strom von 5 Daniell'schen Elementen geht 10 Minuten lang durch 2 elektrolytische Becher, von welchen der eine eine Silberlösung, der andere angesäuertes Wasser enthält. Eine Tangentenbussole im Schliessungsbogen weist auf eine Stromstärke von 0,5 Ampère. Das Gewicht des ausgeschiedenen Silbers ist dann $0{,}001118 \times 0{,}5 \times 10 \times 60 = 0{,}3354$ g, und das Gewicht des im zweiten Becher entwickelten Wasserstoffes $0{,}000010384 \times 0{,}5 \times 10 \times 60 = 0{,}003115$ g.

237. Voltameter. Das zweite der obigen Gesetze, wonach die Grösse der in einer bestimmten Zeit frei gewordenen Jonen der Stromstärke proportional ist, wird nach seinem Entdecker bisweilen als das *Faraday'sche Gesetz* bezeichnet. Faraday wies nach, dass dasselbe ein Mittel gewährt, die Stärke von Strömen auf chemischem Wege zu messen. Einen elektrolytischen Becher, welcher so eingerichtet war, dass man die Stromstärke durch die Grösse der vom Strome hervorgebrachten chemischen Wirkung messen konnte, nannte er ein **Voltameter.**

238. Wasser-Voltameter. Der in Fig. 132 veranschaulichte Apparat kann passend ein Wasser-Voltameter genannt werden, vorausgesetzt, dass die zur Ansammlung der Gase dienenden Röhren geteilt sind, so dass die entwickelten Mengen gemessen werden können. Das Gewicht jedes gemessenen Kubikzentimeters Wasserstoff (bei einer Normaltemperatur von 0^0 C und einem Drucke von 760 mm) beträgt 0,00008988 g. Hat man also die Anzahl der Kubikzentimeter gefunden, welche in einer gegebenen Zeit durch einen Strom von unbekannter Stärke entwickelt werden, so kann man die Stromstärke berechnen,

indem man zunächst das Volumen auf Gewicht reduziert und dann durch das Produkt aus der Zeit und dem elektrochemischen Aequivalente dividiert. Jedes *Coulomb* Elektrizität macht bei seinem Durchgange 0,1155 cbcm Wasserstoff und 0,0577 cbcm Sauerstoff frei. Werden diese Gase zusammen in einem *Mischungsgas-Voltameter* aufgefangen, so erhält man für jedes durchgehende *Coulomb* Elektrizität 0,1732 cbcm von dem entwickelten Gasgemenge. Um 9 g Wasser zu zersetzen, d. h. um 1 g Wasserstoff und 8 g Sauerstoff frei zu machen, sind 96,302 *Coulomb* erforderlich, welche mit einer E.M.K. von mindestens 1,47 Volt durch die Flüssigkeit geschickt werden müssen (vergl. Art. 482).

239. Kupfer- und Silbervoltameter. Wenn schwefelsaures Kupferoxyd zwischen 2 Kupferelektroden elektrolysiert wird, so löst sich, wie oben erwähnt wurde, die Anode langsam auf, während sich an der Kathode eine Schicht von einer gleichen Quantität Kupfer ansammelt. Ein Coulomb Elektrizität setzt 0,0003281 g ab; und um ein Gramm abzusetzen, müssen im Ganzen 3048 Coulomb durch die Elektroden fliessen. Ein Strom von einem Ampère setzt in jeder Stunde 1,177 g Kupfer oder 4,0248 g Silber ab.

Wenn man eine der Elektroden vor und nach dem Durchgange des Stromes wiegt, so findet man, dass die Zunahme (oder Abnahme) der hindurchgeflossenen Elektrizitätsmenge proportional ist. Im Jahre 1879 schlug Edison, der bekannte Erfinder, vor, diese Methode zu benutzen, um die Elektrizitätsmenge zu messen, welche einem Hause mit elektrischer Beleuchtung zugeführt sei; indem ein kleines Kupfervoltameter, welches in dem das Haus versehenden Schliessungsbogen einzuschalten sei, als Elektrizitätsmesser dienen sollte. Verschiedene andere Arten von Coulombmetern sind in Vorschlag gebracht worden, mit Uhrwerkzählern, welche integrierende Scheiben umdrehen, oder mit andern mechanischen Vorrichtungen, welche die gesamte vom Strome zugeführte Elektrizitätsmenge summieren.

240. Vergleich der Voltameter und Galvanometer. Sowohl das *Galvanometer,* wie das *Voltameter* haben den Zweck,

die Stromstärke zu messen, das eine auf magnetischem, das andere auf chemischem Wege. Faraday wies nach, dass die magnetischen und chemischen Wirkungen eines Stromes einander proportional sind. Fig. 133 zeigt einen Stromkreis, welcher so abgezweigt ist, dass der Strom sich teilt, indem ein Teil durch einen Zweig von geringem Widerstande r und ein Teil durch einen solchen von grösserm Widerstande R fliesst. Der Strom fliesst zum grössern Teil durch die Bahn von geringerm Widerstande. Werden 3 Amperometer verwandt, so lässt sich zeigen, dass die Zahl der Ampère im Hauptschliessungsbogen gleich der Summe der Ampère in den beiden Abzweigungen ist. In Fig. 134 hat man die 3 Amperometer durch 3 Kupfervoltameter ersetzt. Das Gewicht des Kupfers, welches in dem im Hauptstromkreise befindlichen Voltameter A ausgeschieden wird, ist gleich der Summe der Gewichte des in den beiden Abzweigungen bei B und C ausgeschiedenen Kupfers. Das Galvanometer lässt jedoch durch die Stellung der Nadel die Stromstärke in jedem Augenblick erkennen, und zeigt die Aenderungen der Stromstärke von Moment zu Moment. Beim Voltameter kann ein veränderlicher Strom die Gasblasen oder die Kupferatome in diesem Augenblicke schnell, und im nächsten langsam frei machen, aber alle die verschiedenen Mengen werden einfach zu einer totalen Summe vereinigt. In der That giebt uns das Voltameter »das Zeitintegral« des Stromes. Das Voltameter giebt uns nicht sowohl an, wie *stark der Strom* in einem beliebigen Augenblicke war, sondern vielmehr, *welche Elektrizitätsmenge* im ganzen während des Versuchs durch dasselbe geflossen ist.

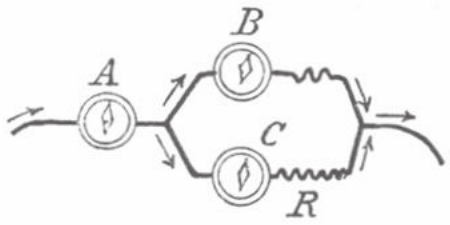


Fig. 133.

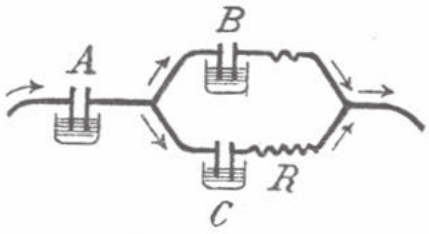


Fig. 134.

241. Chemischer Nachweis für schwache Ströme. Ein sehr schwacher Strom genügt, um in gewissen Körpern eine wahrnehmbare chemische Aenderung hervorzubringen. Werden

ein paar Krystalle des Jodkalium, eines weissen Salzes, in Wasser aufgelöst und darauf etwas Stärke hinzugefügt, so erhält man einen sehr empfindlichen Elektrolyt, welcher an der Anode eine indigoblaue Farbe annimmt, sobald ein sehr schwacher Strom hindurchgeht. Durch die Zersetzung des Salzes wird an der Anode Jod frei, welches auf die Stärke wirkt und mit ihr eine gefärbte Mischung bildet. Taucht man weisses Löschpapier in die präparierte Flüssigkeit, legt dasselbe dann auf die Kathode und berührt es mit der Anode, so kann man auf diese Weise sehr bequem die vom Strome herrührende Färbung prüfen. Eine Lösung von Ferrocyankalium (gelbes Blutlaugensalz) liefert bei der Elektrolyse das bekannte Berliner Blau. Bain machte den Vorschlag, dies bei einem chemischen Schreibtelegraphen zu verwerten, indem die kurzen und langen Ströme, welche von einer Batterie durch die Leitung gesandt würden, auf diese Weise mit blauer Farbe auf einen Streifen präparierten Papiers aufgezeichnet werden könnten, welcher durch ein Uhrwerk am Ende des positiven Drahtes entlang gezogen würde. Faraday zeigte, dass die chemische Färbung eines mit Stärke und Jodkalium angefeuchteten Papierstreifens beim Durchgange jeder Art von Elektrizität hervorgebracht wurde — sei es Reibungselektrizität oder galvanische oder Thermo- oder Magnetelektrizität — selbst durch die Elektrizität des Zitteraals. In der That führte er diese chemische Probe als einen Beweis der Identität der verschiedenen Arten der Elektrizität an.

242. Innere und äussere Wirkungen. In einer der vorhergehenden Vorlesungen wurde nachgewiesen, dass die Grösse der chemischen Wirkung innerhalb der Elemente der Batterie der Stromstärke proportional ist. Daher findet das erste Gesetz des Art. 235 sowohl auf den innerhalb der Batterie befindlichen Teil des Schliessungsbogens Anwendung, als auf den ausserhalb der Batterie befindlichen Teil.

Angenommen, 3 Daniell'sche Elemente werden zur Zersetzung des Wassers in einem Voltameter gebraucht. Während dann 1 Gramm Wasserstoff (11,126 cbcm) und 8 Gramm Sauer-

stoff (5563 cbcm) in dem Voltameter frei werden, werden in jedem Elemente der Batterie 31,5 g Kupfer abgesetzt und (wenn man den durch lokale Wirkung erzeugten Verlust nicht in Anrechnung bringt) 32,5 g Zink in jedem Elemente aufgelöst.

243. Hieraus geht mit Evidenz hervor, dass die elektrolytische Zelle die Umkehr des Volta'schen Elements ist. Die in dem Volta'schen Elemente verrichtete chemische Arbeit liefert die Energie des Stromes, welchen jenes Element in dem Schliessungsbogen erregt. In der elektrolytischen Zelle wird chemische Arbeit verrichtet, indem die erforderliche Energie von dem elektrischen Strome geliefert wird, welchen eine selbstständige Batterie oder eine andere Quelle in den Becher entsendet. Angenommen, ein Strom von der Stärke C würde durch ein Element geschickt, dessen E.M.K. = E sein möge und welches in derselben Richtung wirkt wie der Strom fliesst. Die Energie, welche der Strom von diesem Elemente pro Sekunde empfängt, ist gleich dem Produkte C. E (vergl. Art. 430) indem die chemische Energie des Volta'schen Elementes in den Stromkreis dort eintritt, wo die chemische Wirkung vor sich geht. In Fig. 135 ist die Stromrichtung durch die Pfeile mit dicken

Fig. 135.

Schäften angegeben, und die Richtung der E.M.K. durch den gefiederten Pfeil. Wenn z. B. 10 Ampère durch ein Daniell'sches Element fliessen, das eine E.M.K. von 1,1 Volt besitzt, so beträgt die vom Element ausgehende Kraft 11 Watt. Wird jedoch das Element so in den Stromkreis eingeschaltet, dass die E.M.K. des erstern dem längs des Schliessungsbogens fliessenden Strome entgegen ist, (vergl. die rechts befindliche Abbildung der Figur), so ist die Energie pro Sekunde gleich dem negativen Produkte von C und E, indem das negative Vorzeichen anzeigt, dass der Stromkreis Energie verliert, da ein Teil seiner Energie zur Ver-

richtung chemischer Arbeit in dem Elemente verbraucht wird. Wenn der Strom rückwärts durch ein Daniell'sches Element geschickt wird, so kehren sich die chemischen Vorgänge um: das Kupfer wird aufgelöst und das Zink ausgeschieden. Doch sind nicht alle Elemente in ihrer chemischen Wirkung umkehrbar.

Eine Theorie der Elektrolyse und einige Beispiele ihrer Anwendung finden sich in der Vorlesung über Elektrochemie.

XX. VORLESUNG: *Physikalische und physiologische Wirkungen des Stromes.*

244. Molekularwirkungen. Werden metallische Leiter einer fortgesetzten Einwirkung von Strömen unterworfen, so vollziehen sich in ihnen langsame molekulare Veränderungen. Drähte von Kupfer oder Messing werden unter der Einwirkung von Strömen spröde. Während des Durchganges des Stromes durch metallische Drähte nimmt ihre Kohäsion zeitweilig ab; auch scheint eine Abnahme ihres Elastizitätskoeffizienten statt zu finden. Edlund glaubte an gespannten Drähten eine bestimmte Ausdehnung wahrzunehmen, wenn ein Strom durch sie gesandt wurde; doch ist bis jetzt noch nicht zur Genüge nachgewiesen, dass diese Ausdehnung unabhängig von derjenigen Ausdehnung ist, welche eine Folge der Erhitzung des Drahtes ist, die von dem dem Strome gebotenen Widerstande herrührt.

245. Elektrische Osmose. Wird ein starker Strom in gewisse Flüssigkeiten geleitet, um dieselben zu elektrolysieren, und trennt man die Elektroden durch eine poröse Scheidewand, so führt der Strom auf mechanische Weise einen Teil der Flüssigkeit durch die poröse Scheidewand, so dass die Flüssigkeit auf der einen Seite höher steht, als auf der andern. Diese als *elektrische Osmose* bekannte Thatsache ist bei schlecht leitenden Flüssigkeiten, wie Alkohol und Schwefelkohlenstoff, sehr augenscheinlich. Der Durchgang durch die Scheidewand findet in der Richtung des Stromes statt, d. h. die Flüssigkeit steht an der Kathode höher, als an der Anode.

246. Elektrische Destillation. Im engen Zusammenhange mit der vorigen Erscheinung steht die *elektrische Destillation* von Flüssigkeiten. Beccaria beobachtete, dass eine elektrisierte Flüssigkeit schneller verdunstet, als eine unelektrische. Gernez hat neuerdings gezeigt, dass in einer gebogenen, geschlossenen Röhre, welche zwei Teile einer Flüssigkeit enthält, von denen der eine stark +, der andere stark — elektrisch ist, die Flüssigkeit von der + nach der — Seite übergeht. Diese scheinbare Destillation ist nicht eine Folge des Temperaturunterschiedes, noch hängt sie von der Grösse der beeinflussten Oberfläche ab, sondern die Flüssigkeit breitet sich allmählich längs der innern Oberfläche der Glasröhren aus. Schlechte Leiter, wie z. B. Terpentin, verbreiten sich nicht in dieser Weise.

247. Diaphragmen-Ströme. Professor Quinke machte die Entdeckung, dass in einer Flüssigkeit ein Strom entsteht, wenn dieselbe durch ein poröses Diaphragma gepresst wird. Diese Erscheinung lässt sich als die Umkehrung der elektrischen Osmose auffassen. Die E.M.K. des Stromes richtet sich nach dem Drucke und nach der Natur des Diaphragmas. Wurde Wasser bei einem Drucke von einer Atmosphäre durch Schwefel gepresst, so betrug die Potentialdifferenz mehr als 9 Volt. Bei einem Diaphragma von Porzellan oder tierischer Blase betrug die Differenz nur 0,35, resp. 0,01 Volt.

248. Elektro-Kapillarerscheinungen. Wenn man eine horizontale, an den Enden nach oben umgebogene Glasröhre mit verdünnter Säure füllt, und in die Mitte der Röhre einen Tropfen Quecksilber bringt, so bewegt sich derselbe, falls ein Strom durch die Röhre geschickt wird, nach dem negativen Pole. Man nimmt an, dass an der Trennungsfläche des Quecksilbers und der Säure in Folge der Elektrolyse sehr geringe Gasmengen frei werden, und die Oberflächenspannung sich hierdurch bedeutend ändert, so dass infolge der Kapillarkräfte eine Bewegung erfolgt. Lippmann, Dewar und Andere haben nach diesem Prinzipe *Kapillar-Elektrometer* konstruiert, bei denen durch den Druck einer Flüssigkeitssäule der Elektro-Kapillarkraft, welche an der

Trennungsfläche des Quecksilbers und der verdünnten Säure ausgeübt wird, das Gleichgewicht gehalten wird. Die Elektro-Kapillarkraft ist annähernd der elektromotorischen Kraft proportional, falls diese ein Volt nicht übersteigt. Fig. 136 zeigt das

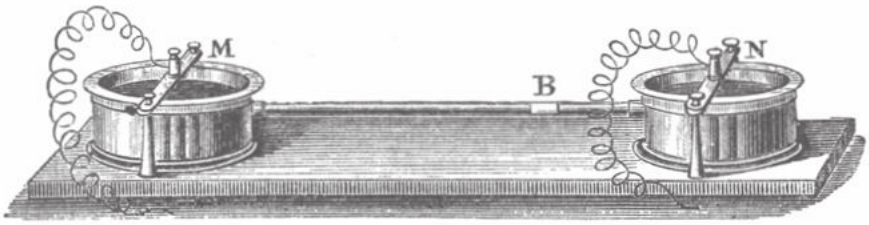


Fig. 136.

Kapillar-Elektrometer von Dewar. Eine Glasröhre liegt horizontal zwischen zwei gläsernen Gefässen, in welche dieselbe mit ihren Enden einmündet. Die Röhre wird mit Quecksilber gefüllt, welches einen Tropfen verdünnter Säure einschliesst. Als Elektroden dienen Platindrähte, welche in das Quecksilber der Gefässe tauchen. Eine E.M.K. von nur $\frac{1}{300}$ Volt genügt, um eine messbare Verschiebung des Tropfens hervorzubringen. Die Richtung, nach welcher diese Verschiebung stattfindet, hängt von der Richtung des Stromes ab.

249. Physiologische Wirkungen. Wenn Elektrizät durch den menschlichen Körper geleitet wird, so bringt sie in den Nerven gewisse schmerzhafte Empfindungen hervor und bewirkt ein unfreiwilliges Zusammenziehen der Muskeln. Die plötzliche Entladung selbst einer geringen Elektrizitätsmenge bei einer auf hohes Potential geladenen Leydener Flasche oder einer Induktionsrolle (s. Fig. 129) veranlasst im Körper eine durchdringende, schmerzhafte *Erschütterung*. Der Strom einiger starken Grove'schen Elemente, welchen man durch den eigenen Körper leitet, indem man die Leitungsenden mit nassen Händen anfasst, verursacht eine ganz andere, unangenehme, stechende Empfindung in Arm- und Schultergelenken, ohne jedoch krampfhafte Kontraktionen zur Folge zu haben, ausgenommen bei nervösen oder schwachen Personen, beim Oeffnen oder Schliessen des Stromes. Dieser Unterschied hat darin seinen Grund, dass die Gewebe des Körpers einen sehr beträchtlichen Wiederstand bieten, und

dass die Potentialdifferenz im ersten Falle viele tausend Volt betragen kann; folglich kann die in der Leydener Flasche angehäufte Menge, obgleich sie in Wirklichkeit sehr gering ist, doch durch ihre grosse E.M.K. den Widerstand auf einmal überwinden. Obgleich die Batterie in dem Falle, wo sie durch einen guten Leiter hindurchwirkt, in einer Sekunde tausendmal mehr Elektrizität liefert, so kann dieselbe infolge ihrer begrenzten E.M.K. doch nur einen kleinen Bruchteil durch den Körper hindurchschicken, da derselbe einen grossen Widerstand bietet.

Nachdem Cunäus im Jahre 1745 den elektrischen *Schlag* der Leydener Flasche entdeckt hatte, wurden noch viele andere Versuche angestellt. Ludwig XV von Frankreich liess 700 Karthäuser Mönchen, welche sich die Hände gegeben hatten, einen Schlag von einer Batterie Leydener Flaschen erteilen, und erzielte dabei einen wunderbaren Erfolg. Franklin tötete einen Truthahn durch einen Schlag von einer Leydener Flasche.

Im Jahre 1752 machte Sulzer die folgende Beobachtung: »Wenn man 2 Stücke Blei und Silber verbindet, und dieselben dann auf die Zunge legt, so empfindet man einen gewissen *Geschmack,* welcher dem des grünen Vitriols gleicht, während jedes Stück einzeln keine derartige Empfindung hervorbringt.« Diesen **galvanischen Geschmack,** von welchem man damals noch nicht vermutete, dass er mit der Elektrizität in irgend welchem Zusammenhange stände, kann man hervorrufen, wenn man eine Silbermünze auf die Zunge legt und eine Stahlfeder darunter hält, so dass eine metallische Berührung zwischen beiden stattfindet. Denselben Geschmack nimmt man wahr, wenn man die beiden Polenden eines Volta'schen Elements mit der Zunge in Berührung bringt.

Ritter machte die Entdeckung, dass ein schwacher durch den Augapfel gesandter Strom dort dieselbe Empfindung hervorruft, wie ein greller *Lichtblitz,* welcher den Sehnerv plötzlich reizt. Ein stärkerer Strom, welcher mittelst feuchter, an den Batterieenden befestigter Leiter hindurchgeschickt wurde, erzeugte, so lange er zwischen Stirn und Hand floss, eine blaue und grüne

Lichtempfindung. Helmholtz bemerkte bei der Wiederholung dieses Versuchs bloss eine seltsame Farbenempfindung. Dr. Hunter sah Lichtblitze, als er ein Stück Metall unter seine Zunge hielt und dasselbe mit einem zweiten berührte, welches die feuchten Gewebe des Auges berührte. Volta und Ritter hörten musikalische Töne, als sie einen Strom durch ihre Ohren leiteten; und Humboldt fand, dass in den Geruchsorganen eine Empfindung hervorgebracht wurde, wenn ein Strom zwischen der Nasenöffnung und dem Kehldeckel fliesst. Jeder der erwähnten Sinne kann durch den Strom zur Thätigkeit gereizt werden. Der Mensch besitzt keinen besonderen Sinn für die Wahrnehmung elektrischer Kräfte, wie er solche für Licht und Schall besitzt; doch liegt kein Grund vor, weshalb man es für unmöglich halten sollte, dass einige der niedern Tiere mit einem besondern elektrischen Sinne begabt wären.

Der folgende Versuch zeigt die Wirkung schwacher Ströme auf kaltblütige Tiere. Legt man eine Kupfer- oder Silbermünze auf eine Zinkplatte, und lässt eine gewöhnliche Gartenschnecke über letztere kriechen, so zieht dieselbe ihre Fühlhörner ein und rollt ihren Körper zusammen, sobald sie mit dem Kupfer in Berührung kommt. Lässt man sie über zwei Kupferdrähte kriechen, welche man hierauf mit einem schwachen Volta'schen Elemente verbindet, so kündigt sie augenblicklich durch eine ähnliche Zusammenziehung das Entstehen eines Stromes an [1]).

250. Muskelzusammenziehung. Im Jahre 1678 zeigte Swammerdam dem Grossherzog von Toskana folgenden Versuch: Wenn man einen Muskel eines Froschschenkels, welcher an einem mit Silberdraht umwickelten Nervenfaden aufgehängt ist, über eine kupferne Stütze hält, so dass sowohl der Nerv, als auch der Draht das Kupfer berühren, so zieht sich der Muskel sofort zusammen. Mehr als ein Jahrhundert später wurde Galvani auf

---

1) Es ist kaum glaublich, dass ein gewisser Jules Alix einst allen Ernstes ein Telegraphensystem in Vorschlag brachte, welches auf dieser physiologischen Erscheinung basierte.

dieselbe Thatsache aufmerksam, indem er die Beobachtung machte, dass die Schenkel von frisch getöteten Fröschen unter dem Einflusse des »Rückschlages« jedesmal, wenn eine in der Nähe befindliche Elektrisiermaschine entladen wurde, sich krampfhaft zusammenzogen. Unbekannt mit Swammerdam's Versuch, machte er im Jahre 1786 die Entdeckung (auf welche bereits in Art. 158 hingewiesen wurde, da sie schiesslich zur Entdeckung der Voltaschen Säule führte), dass, wenn Nerven und Muskeln mit zwei verschiedenen, sich einander berührenden Metallen in Berührung kommen, eine Zusammenziehung des Muskels stattfindet. Die nach Galvani präparierten Froschschenkel zeigt Fig. 137. Nach-

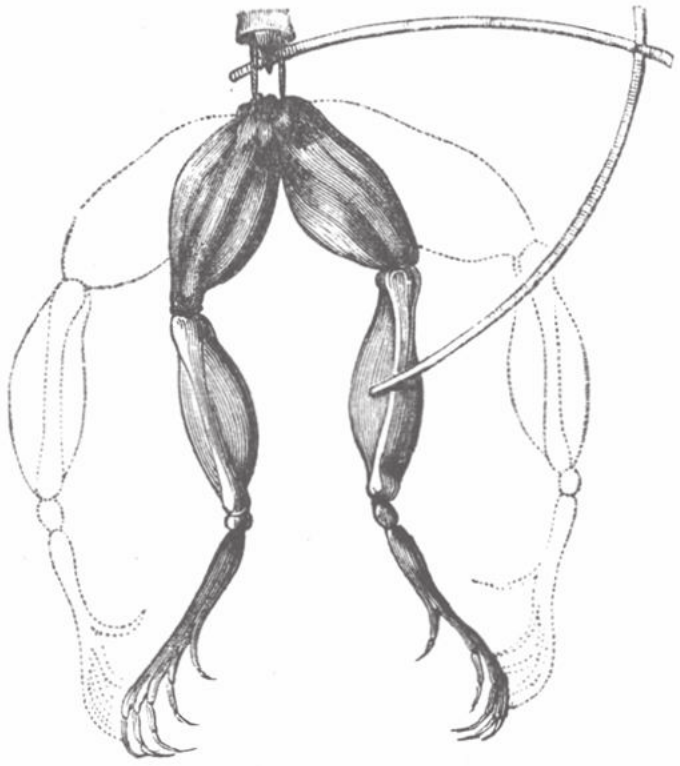


Fig. 137.

dem das Tier getötet ist, werden die Hinterschenkel abgelöst und abgehäutet; die Schenkelnerven und ihre Verbindungen mit den Lendenrückenwirbeln bleiben sitzen. Die Schenkel bewahren ihre zusammenziehende Kraft noch einige Stunden nach dem Tode. Die auf diese Weise präparierten Froschschenkel bilden ein ungemein empfindliches Galvanoskop: an ihnen lassen sich z. B. die sehr schwachen Induktionsströme des Telephons (Vorl. 53) nachweisen, obschon die empfindlichsten Galvanometer

dieselben nur unvollkommen anzeigen. Galvani und Aldini wiesen nach, dass andere Tiere gleiche Wirkungen erleiden. Mit einer aus 100 Plattenpaaren bestehenden Säule experimentierte Aldini an frisch getöteten Schafen, Ochsen und Kaninchen, und fand, dass bei ihnen krampfhafte Muskelzusammenziehungen stattfinden. Humboldt wies dasselbe bei Fischen nach; und Zanotti, welcher durch einen frisch getöteten Grashüpfer einen Strom schickte, veranlasste ersteren zu seinem gewöhnlichen Zirpen. Aldini, und später Dr. Ure aus Glasgow experimentierten an den Körpern hingerichteter Verbrecher, mit schrecklich anzusehendem Erfolge. Die Gesichtsmuskeln erlitten grässliche Verzerrungen und die Brust hob sich mit der Zusammenziehung des Zwerchfelles. Die kleinen Muskeln, welche an den Wurzeln der Kopfhaare sitzen, scheinen vorzugsweise für elektrische Zustände empfindlich zu sein, da sich die Haare beim Elektrisieren sofort sträuben. Der Widerstand, welchen der menschliche Körper dem Durchgange des elektrischen Stromes entgegensetzt, richtet sich hauptsächlich nach der Trockenheit der Haut. Ist die Haut feucht, so beträgt dieser Widerstand 300 bis 10,000 Ohm. Verschiedene Versuche, welche man in Amerika bei der Hinrichtung von Verbrechern angestellt hat, haben ergeben, dass der Widerstand des menschlichen Körpers im Durchschnitt 2500 Ohm beträgt, und dass 3000 Volt zwischen Kopf und Rückgrat den sofortigen Tod zur Folge hatten.

Ein Strom von circa 20 Milliampère bringt schreckliche Muskelkontraktionen hervor, während ein Strom von 2 Ampère bei seinem Durchgange durch ein wesentliches Organ fast immer verhängnisvoll ist. Die Wirkung des Stromes ist eine zweifache: erstens wirkt er auf die Nerven und verursacht Krämpfe; zweitens zerstört er das Gewebe, sei es durch Verbrennung, sei es durch Elektrolyse, indem er das Blut zerrinnen macht. Um einen durch einen elektrischen Schlag betäubten Menschen wiederzubeleben, hat man dieselben Operationen auszuführen, welche bei Ertrunkenen angewendet werden.

251. Bedingungen der Muskelzusammenziehung.

Um eine Muskelzusammenziehung hervorzurufen, muss der Strom einen Teil des Nervs der Länge nach durchfliessen. In einem frisch präparierten Frosche verursacht der Strom nur momentan eine Zusammenziehung, wenn der Schliessungsbogen geöffnet oder geschlossen wird. Ein schnell unterbrochener Strom veranlasst eine zweite Zusammenziehung, bevor die erste vorüber ist, und der Muskel zeigt auf diese Weise eine fortwährende, dem *Starrkrampfe* gleichende Zusammenziehung. Nach kurzer Zeit verliert der präparierte Frosch einen Teil seiner Empfindlichkeit, und ein direkter Strom (d. h. ein solcher, welcher den Nerv in der Richtung vom Gehirne zum Muskel durchströmt) bringt nur dann eine Wirkung hervor, wenn der Schliessungsbogen geschlossen wird, während ein »umgekehrter« Strom nur dann eine Wirkung hervorbringt, wenn der Schliessungsbogen geöffnet wird. Matteucci, welcher diese Beobachtungen machte, entdeckte auch durch Versuche an lebenden Tieren, dass die Sinnes- und die Bewegungsnerven sich in Bezug auf Leitungsfähigkeit unterscheiden, — ein »direkter« Strom affiziert die Bewegungsnerven, wenn der Schliessungsbogen geschlossen, und die Sinnesnerven, wenn derselbe geöffnet wird, während ein »umgekehrter« Strom den umgekehrten Erfolg hat. Bis jetzt weiss man jedoch noch wenig von den Bedingungen der Leitungsfähigkeit der Nervensubstanz; Nerven leiten besser als Muskelgewebe, Knorpel oder Knochen; das Blut ist jedoch der beste Leiter von allen Bestandteilen des Körpers. Kräftige Ströme elektrolysieren das Blut ohne Zweifel bis zu einem gewissen Grade, indem sie dasselbe und die darin enthaltenen Eiweissstoffe gerinnen machen. Die *zusammenziehende* Kraft, welche von der Einwirkung des Stromes herrührt, scheint eine spezifische Eigenschaft des *Protoplasmas* zu sein, überall, wo dasselbe auftritt. Die Amöben, die niedrigsten, einfachsten Organismen, erleiden Zusammenziehungen. Ritter machte die Entdeckung, dass die *Sinnpflanze* sich beim Elektrisieren öffnet und Burdon Sanderson hat gezeigt, dass diese Eigenschaft sich auch auf andere Pflanzen erstreckt, dass dieselbe sich bei den *fleischfressen-*

den Pflanzen findet, z. B. bei der Venusfliegenfalle (Dionaea).

252. Animalische Elektrizität. Obschon Galvani zugab, wenigstens in seinen spätern Schriften, dass die solche Wirkungen hervorbringende Elektrizität von den verwendeten Metallen herrühre, bestand er doch auf dem Vorhandensein einer *animalischen Elektrizität*, welche in den Muskel- und Nervengeweben ihren Sitz hätte. Er zeigte, dass sich ohne jede Anwendung von Metallen Zusammenziehungen schon dadurch hervorrufen liessen, dass man einen Nerv an zwei verschiedenen Punkten längs seiner Oberfläche mit einem von einem lebenden Frosch abgeschnittenen Muskelstück berührte; und dass ein metallischer Konduktor, welcher einen Nerv mit einem Muskel verbindet, gleichfalls genügte, um in dem Muskel eine Zusammenziehung hervorzurufen. Galvani und Aldini hielten diese Thatsachen für Widerlegungen der Volta'schen Kontakt-Theorie. Volta betrachtete sie als einen Beweis dafür, dass die Berührung zwischen Nerv und Muskel selbst (wie in dem Falle zweier verschiedenen Metalle) entgegengesetzte elektrische Zustände erzeugte. Später zeigte Nobili, dass, wenn der Nerv und der Muskel des Frosches durch Wasser mit den Enden eines empfindlichen Galvanometers in Verbindung gesetzt werden, ein mehrere Stunden dauernder *Strom* erzeugt wird; er stellte sogar eine Reihe von Froschschenkeln zusammen, wie die Elemente einer Batterie, und verstärkte auf diese Weise den Strom. Matteucci zeigte, dass durch den Muskel allein eine elektromotorische Kraft entsteht. Du Bois Reymond hat gezeigt, dass, wenn das Ende eines Muskels quer durchschnitten wird, die Enden der Muskelfasern des Querschnitts negativ und die Seitenflächen derselben positiv sind, und dass diese Potentialdifferenz auch dann einen Strom erzeugt, wenn der Muskel in Ruhe ist. Um dies nachzuweisen, benutzte er ein empfindliches, astatisches Galvanometer mit 20,000 Drahtwindungen; und um Fehler zu vermeiden, welche durch die Berührung der Drahtenden mit den Geweben entstehen könnten, gebrauchte er *unpolarisierbare Elektroden*, welche er sich auf die Weise herstellte, dass er die Enden der Zink-

spitzen in eine gesättigte Lösung von schwefelsaurem Zinkoxyd tauchte. Diese Lösung war in einer feinen Glasröhre enthalten, welche am Ende durch einen porösen Stöpsel von angefeuchtetem Kaolin verschlossen war. Ein nicht verletzter in Ruhe befindlicher Muskel liefert überhaupt keinen Strom. Ein verletzter in Ruhe befindlicher Muskel liefert einen Strom, der von der Schnittstelle zum gesunden Teile fliesst (und darauf durch das Galvanometer zur Schnittstelle zurückkehrt). Ein gesunder, in Thätigkeit befindlicher Muskel liefert einen Strom, der von dem thätigen zum unbeschäftigten Teile fliesst. Du Bois Reymond erhielt Ströme durch seine eigenen Muskeln, indem er die Spitzen seiner Zeigefinger in zwei Schalen mit Salzwasser tauchte, die mit den Enden des Galvanometers in Verbindung standen. Ein plötzliches Zusammenziehen der Muskeln eines Armes erzeugte einen Strom in der Richtung von den zusammengezogenen zu den nicht zusammengezogenen Muskeln. Wie Dewar gezeigt hat, entsteht ein elektrischer Strom im Sehnerv, wenn das Licht auf die Netzhaut des Auges fällt. In der Haut, und besonders in der des Flussaals ist eine E.M.K. thätig, welche von aussen nach innen gerichtet ist.

253. Medizinische Anwendungen. Elektrische Ströme hat man mit Erfolg bei der Wiederbelebung von Personen angewendet, die vom Ertrinken gerettet wurden, da die Zusammenziehung des Zwerchfelles und der Brustmuskeln dazu dient, das Atmen zu beschleunigen. Seit der Entdeckung der Leydener Flasche hat man mannigfache Versuche gemacht, um eine elektrische ärztliche Behandlung zu begründen. Diskontinuierliche Ströme, besonders solche, welche von kleinen Induktionsrollen und magneto-elektrischen Maschinen herrühren, benutzen praktische Aerzte, um die Nerven bei Lähmungen und andern Krankheiten anzuregen. Doch sollte man elektrische Ströme nur mit grosser Vorsicht anwenden, und stets unter der Leitung von regelrecht ausgebildeten Aerzten.

Es ist nicht überflüssig, in dieser Beziehung ernstlich vor den zahlreichen Quacksalbern zu warnen, welche das unkundige

Publikum mit magnetischen und galvanischen »Heilmitteln« täuschen. In vielen Fällen haben diese überall öffentlich bekannt gemachten Betrügereien unberechenbares Unheil angestiftet, und in den sehr wenigen Fällen, wo angeblich ein guter Erfolg zu verzeichnen war, war das Heilmittel wahrscheinlich nicht Magnetismus, sondern Wolle!

Die übliche Dosis bei Anwendung eines Stromes beträgt 2 bis 10 Milliampère. Ein Apparat, welcher solche Ströme nicht liefert, ist zu Heilzwecken unbrauchbar. Kontinuierliche Ströme scheinen bei der Anode eine beruhigende Wirkung auszuüben, welche bei Neuralgie und bei schmerzhaften Anfällen von Wert ist, und bei der Kathode eine erhöhte Reizbarkeit, welche im Falle einer Lähmung von Nutzen ist. Der kontinuierliche Strom wird auch in der Weise verwendet, dass er auf elektrolytischem Wege Geschwülste beseitigt. Wechselströme und gleichgerichtete Ströme, schnell unterbrochen, reizen die Nerven an.

ZWEITER TEIL.

KAPITEL IV.

ELEKTROSTATIK.

XXI. VORLESUNG: *Potentialtheorie.*

254. Die Vorlesungen des ersten Kapitels hatten den Zweck, den Leser mit einigen Fundamentalbegriffen über das Vorhandensein und Messen bestimmter Elektrizitätsmengen bekannt zu machen. Diese Vorlesung, welche für den Anfänger eine der schwierigsten und wichtigsten ist, und die er deshalb um so sorgfältiger zu studieren hat, enthält eine ausführlichere Erklärung derjenigen Gesetze, welche von der Grösse der Elektrizitätsmengen und ihrer Messung handeln. Die Richtigkeit des Satzes: Wissenschaft ist Messen, zeigt sich in keinem Wissenszweige deutlicher, als in der Elektrizitätslehre. Derjenige Teil derselben, welcher von dem Messen elektrischer Ladungen handelt, heisst **Elektrostatik.** Wir beginnen mit der Erklärung der einfachen elektrischen Kraftgesetze, welche im ersten Kapitel mittelst einfacher Experimente beleuchtet wurden.

255. Erstes Gesetz der Elektrostatik. *Gleichnamige elektrische Ladungen stossen sich ab, ungleichnamige elektrische Ladungen ziehen sich an.* Die in diesem Gesetze angegebenen fundamentalen Thatsachen wurden in der ersten Vorlesung zur Genüge erklärt. Obgleich diese Thatsachen dem Leser geläufig und scheinbar einfach sind, so erfordern sie doch zu ihrer vollständigen Erklärung die Zuhilfenahme der höheren mathema-

tischen Analysis. Sie sollen hier als einfache Thatsachen der Beobachtung behandelt werden.

256. Zweites Gesetz der Elektrostatik. *Die Kraft, welche 2 elektrische Ladungen auf einander ausüben* (man nehme an, dass sie an zwei Punkten oder auf 2 kleinen Kugeln angesammelt sind) *ist ihrem Produkte direkt, dem Quadrate ihres Abstandes umgekehrt proportional.* Dieses von Coulomb entdeckte und nach ihm benannte Gesetz wurde bereits kurz in Art. 19 erwähnt, als die Versuche mit der Torsionswage beschrieben wurden; und es wurden dort auch Beispiele zur Beleuchtung beider Teile des Gesetzes angeführt. Wir sahen auch, dass ein analoges Gesetz für die Kräfte galt, welche zwei Magnetpole auf einander ausübten. Coulomb wendete auch die Methode der Schwingungen an, um die Angaben der Torsionswage zu verifizieren und erhielt eine völlige Bestätigung der Resultate. Wir können die beiden Teile des Coulomb'schen Gesetzes auf folgende Weise symbolisch ausdrücken. Bezeichnen f die Kraft, q und q' die Elektrizitätsmengen der beiden Ladungen und r den Abstand zwischen ihnen, so ist;

1) f proportional zu $q \times q'$

und 2) f proportional zu $\frac{1}{r^2}$.

Diese beiden Ausdrücke lassen sich zu einem vereinigen; und es ist sehr zweckmässig, unsere Masseinheiten so zu wählen, dass wir, statt der symbolischen Ausdrücke, die Gleichung schreiben können:

$$f = \frac{q \cdot q'}{r^2}.$$

257. Einheit der elektrischen Masse. Wollen wir aber das Vorstehende als eine Gleichheit schreiben, so ist klar, dass wir unsere elektrische Einheit in Uebereinstimmung mit den bereits feststehenden Einheiten zur Messung der Kraft und des Abstandes wählen müssen. Alle Elektriker sind jetzt thatsächlich übereingekommen, ein System anzunehmen, welches auf 3 fundamentalen Einheiten basiert, nämlich auf dem **Zentimeter** als *Längen-*

einheit, auf dem **Gramm** als *Masseneinheit* und auf der **Sekunde** als *Zeiteinheit*. Alle andern Einheiten lassen sich aus diesen ableiten, wie in der Anmerkung am Schluss dieser Vorlesung auseinandergesetzt wird. Unter den abgeleiteten Einheiten dieses Systems ist besonders die *Krafteinheit* zu merken, welche **Dyn** genannt wird, d. h. diejenige Kraft, welche, wenn sie eine Sekunde lang auf eine Masse von einem Gramm wirkt, ihr eine Geschwindigkeit von einem Zentimeter pro Sekunde erteilt. Nehmen wir also das Dyn als Krafteinheit und das Zentimeter als Längeneinheit (oder Abstandseinheit), so müssen wir eine elektrische Masseneinheit finden, welche mit denselben in unserer Gleichung übereinstimmt. Es ist ganz klar, dass, wenn jede der Grössen q, q' und r gleich 1 gesetzt würde (d. h. wenn wir jede der beiden Ladungen vom Werte 1 nähmen und sie einen Zentimeter von einander entfernten) der Wert des Ausdruckes $\frac{q \cdot q'}{r^2} = 1$ sein würde. Daher stellen wir folgende **Definition** der *Einheit der Elektrizität* auf, welche wir am Ende der Vorlesung 2 schon kurz anführten: *Eine Einheit der Elektrizität ist diejenige Menge, welche in einer Entfernung von einem Zentimeter von einer gleichen Menge derselben Art dieselbe mit einer Krafteinheit abstösst.*

Ein Beispiel wird es dem Leser erleichtern, die Anwendung des Coulomb'schen Gesetzes zu verstehen.

B e i s p i e l. Zwei kleine Kugeln, welche mit 6 resp. 8 Einheiten positiver Elektrizität geladen sind, befinden sich in einem Abstande von 4 Zentimetern von einander. Es soll die Kraft gefunden werden, welche sie auf einander ausüben. Nach der Formel

$$f = \frac{q \cdot q'}{r^2} \text{ finden wir } f = \frac{6 \cdot 8}{4^2} = \frac{48}{16} = 3 \text{ Dyn.}$$

Im obigen Falle würde die Kraft natürlich eine abstossende sein. Wäre eine dieser Ladungen negativ gewesen, so würde das Produkt $q \cdot q'$ einen negativen Wert gehabt haben, und das Resultat würde — 3 Dyn gewesen sein. Das Vorkommen des negativen Zeichens vor einer Kraft zeigt daher an, dass es eine *anziehende* Kraft ist, während das positive Zeichen eine *ab-*

stossende Kraft bedeuten würde. Da die Intensität eines elektrischen Feldes durch die Kraft gemessen wird, welche dasselbe auf die Ladung 1 ausübt, so folgt, dass die Intensität eines elektrischen Feldes von der Ladung q im Abstande $r = \frac{q}{r^2}$ ist. Wenn das umgebende Medium nicht Luft ist, sondern die spezifische dielektrische Kapazität k hat, so ist das Feld $= \frac{q}{kr^2}$

258. Potential. Zunächst haben wir den Ausdruck *Potential* in seiner Anwendung auf elektrische Kräfte zu definieren. Um die Bedeutung jedoch klar verständlich zu machen, muss eine kleine Erklärung vorausgeschickt werden. Angenommen wir hätten eine Ladung positiver Elektrizität auf einer kleinen isolierten Kugel A (Fig. 138), welche sich in sehr grosser Entfernung von

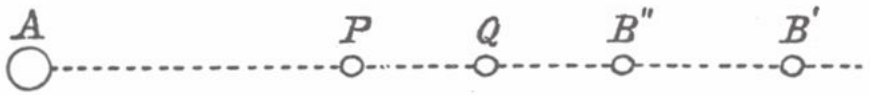


Fig. 138.

allen andern elektrischen Ladungen und elektrischen Konduktoren befindet. Würden wir ihr einen zweiten Körper B nähern, der ebenfalls mit + Elektrizität geladen wäre, so würde A den Körper B abstossen. Doch würde die abstossende Kraft von der *Masse* der neuen Ladung und von ihrer *Entfernung* von A abhängen. Nehmen wir an, dass die neue Ladung, welche A genähert wird, eine Einheit positiver Elektrizität ist; wäre B sehr weit davon entfernt, so würde die abstossende Kraft sehr gering sein, und es bedürfte einer geringen Arbeit, den Körper B in einer Richtung zu bewegen, welche der Richtung der von A ausgeübten abstossenden Kräfte entgegengesetzt ist; je näher aber B dem A rückt, desto grösser wird die abstossende Kraft, und um so mehr Arbeit würde erforderlich sein, um B den abstossenden Kräften entgegen dem A zu nähern. Angenommen, wir hätten in unendlich grosser Entfernung von A begonnen, und dann unsere kleine Versuchsladung B von B' nach B'' vor-

geschoben, hierauf nach Q und so endlich bis zum Punkte P, den von A ausgeübten abstossenden Kräften entgegen, so würden wir einen gewissen Aufwand von *Arbeit* zu machen gehabt haben; diese Arbeit stellt das *Potential*[1]) von A im Punkte P dar. Denn folgendes ist die *Definition* des **elektrischen Potentials**: *Das Potential in irgend einem Punkte ist die Arbeit, welche aufgewendet werden muss, um eine Einheit positiver Elektrizität aus unendlicher Entfernung bis zu jenem Punkte zu bewegen.* Wäre die Ladung auf A negativ gewesen, so würde die Kraft eine anziehende gewesen sein, in welchem Falle wir theoretisch das Potential im Punkte P zu messen hätten, entweder durch den umgekehrten Prozess, indem wir dort eine + Einheit aufstellten, und dieselbe dann den anziehenden Kräften entgegen bis in unendliche Entfernung bewegten, oder auch, indem wir die Grösse der Arbeit berechneten, welche von einer + Einheit verrichtet würde, während dieselbe aus unendlicher Entfernung bis zum Punkte P angezogen wird.

Hat man mehrere elektrische Körper zu berücksichtigen, so lässt sich zeigen, dass ihr Potential für einen bestimmten Punkt gleich der Summe der Potentiale (für jenen Punkt) jedes einzelnen Körpers ist.

Es lässt sich auch nachweisen, dass das Potential im Punkte P in der Nähe eines elektrischen Körpers A gleich der auf A befindlichen Elektrizität ist, dividiert durch den Abstand von A und P.

---

1) Im weitesten Sinne hat man unter Potential so viel wie »Fähigkeit, Arbeit zu verrichten« zu verstehen. Denn wenn wir eine gewisse Menge Arbeit zu verrichten haben, um eine elektrische Einheit aus unendlicher Entfernung gegen die abstossenden Kräfte einer Ladung zu bewegen, so hat die Ladung die Kraft, ebensoviel Arbeit zu verrichten, denn sie verbraucht eine genau ebenso grosse Menge Arbeit, um die elektrische Einheit in unendliche Entfernung zurück zu treiben. Wenn wir ein Kilogramm der Schwerkraft entgegen 5 Meter hoch heben, so vermag das Gewicht des Kilogrammes umgekehrt eine Arbeit von 5 Kilogrammmetern zu verrichten, indem dasselbe auf die Erde zurückfällt. Man vergleiche den Abschnitt über Energie in den Lehrbüchern über elementare Physik.

Oder nennen wir die Menge q und den Abstand r, so ist das Potential $\frac{q}{r}$ [1]).

Beweis. Zuerst bestimme man die Potentialdifferenz zwischen den Punkten P und Q, welche von einer elektrischen Ladung q auf einer kleinen Kugel A herrührt. Man bezeichne den Abstand AP mit r und AQ mit r'; dann ist $PQ = r' - r$. Die

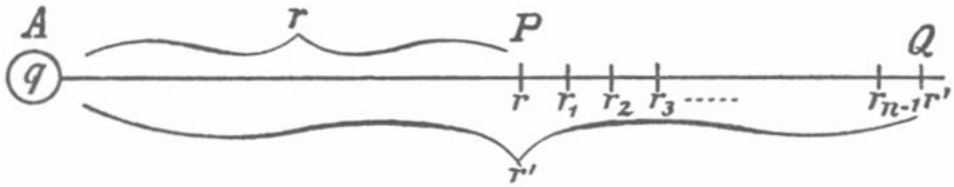


Fig. 139.

Potentialdifferenz zwischen P und Q ist die Arbeit, welche verrichtet wird, wenn man der Kraft entgegen eine + Einheit von Q nach P bewegt, und da Arbeit = Kraft × Weg, durch welchen sie geleistet, so ist

$$V_p - V_q = f(r' - r).$$

Die Kraft, welche q im Punkte P auf eine + Einheit ausübt, ist $\frac{q}{r^2}$; und ebenso die Kraft, welche q im Punkte Q auf eine + Einheit ausübt, $\frac{q}{r'^2}$. Angenommen, der Abstand PQ sei in eine bestimmte Anzahl (etwa n) gleicher Teile geteilt, rr_1; r_1r_2; r_2r_3; .... $r_{n-1}r'$. Die Kraft in r ist $= \frac{q}{r^2}$; in $r_1 = \frac{q}{r_1^2}$ ... etc.

Da man nur r_1 so nahe als man will an r rücken lassen kann, indem man bloss für n eine hinreichend grosse Zahl nimmt, so begeht man keinen grossen Fehler, wenn man annimmt, dass $r \cdot r_1$ ein Mittelwert zwischen r^2 und r_1^2 ist; daher kann man die Durchschnittskraft längs des kurzen Weges von r nach $r_1 = \frac{q}{rr_1}$ setzen. Folglich ist die Arbeit, welche ver-

1) Der vollständige Beweis würde eine elementare Anwendung der Integralrechnung erfordern; doch findet sich weiter unten eine leichte geometrische Beweisführung, welche für vorliegenden Zweck ausreicht.

richtet wird, wenn man von r_1 nach r übergeht:

$$\frac{q}{rr_1}(r_1 - r) = q\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1}\right).$$

Unter derselben Voraussetzung ergiebt sich für die Arbeit, welche verrichtet wird, wenn man von r_2 nach r_1 übergeht:

$$q\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

und für die Arbeit von r_3 nach r_2:

$$q\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3}\right) \text{ etc.}$$

Auf diese Weise ergeben sich n Gleichungen, deren letzte die Arbeit ausdrückt, welche verrichtet wird, wenn man von r' zu r_{n-1} übergeht, nämlich

$$q\left(\frac{1}{r_{n-1}} - \frac{1}{r'}\right).$$

Indem man alle diese Teile der Arbeit addiert, fallen die Zwischenwerte von r weg, und es ergiebt sich für die Arbeit, welche verrichtet wird, wenn man von Q nach P übergeht

$$V_P - V_Q = q\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'}\right).$$

Nimmt man ferner an, dass Q einen unendlich grossen Abstand von A habe, so wird r' unendlich gross, und $\frac{1}{r'} = 0$. In diesem Falle geht die Gleichung über in:

$$V_P = \frac{q}{r}.$$

Hätte man statt einer Elekrizitätsmenge q mehrere Ladungen q', q'', q''' . . . . etc., mit den resp. Abständen r', r'', r''' . . . . etc. von A, so ist endlich

$$V_P = \frac{q'}{r'} + \frac{q''}{r''} + \frac{q'''}{r'''} + \ldots . \text{ etc.}$$

oder $$V_P = \Sigma \frac{q}{r}.$$

Dieser Ausdruck repräsentiert die Arbeit, welche an oder von einer + elektrischen Einheit verrichtet wird, wenn dieselbe aus

unendlicher Entfernung bis zum Punkte P bewegt wird, je nachdem das Potential im Punkte P positiv oder negativ ist.

259. Null-Potential. In einem Punkte, der von allen elektrischen Körpern unendlich weit entfernt ist, würde man überhaupt keine elektrischen Kräfte haben, und das Potential würde den Wert Null haben. Aus Bequemlichkeitsrücksichten ist es jedoch üblich, das jeweilige Potential der Erde als einen willkürlich gewählten Nullpunkt zu betrachten, ebenso wie man die Oberfläche des Meeres zweckmässig als Nullpunkt betrachtet, von welchem aus man Höhen oder Tiefen misst.

260. Potentialdifferenz. Da das Potential die Arbeit vorstellt, welche an einer positiven Einheit verrichtet werden muss, um dieselbe aus unendlicher Entfernung herbeizuschaffen, so ist die *Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten die Arbeit, welche an oder von einer + elektrischen Einheit zu verrichten ist, um dieselbe von dem einen Punkt nach dem andern zu schaffen.* Stellt z. B. V_P das Potential im Punkte P dar, und V_Q das Potential in einem andern Punkte Q, so bezeichnet die Potentialdifferenz $V_P - V_Q$ die Arbeit, welche verrichtet werden muss, um die + Einheit von Q nach P zu bewegen. Es ist zu beachten, dass dieser Wert nur von den Werten des Potentials in P und Q abhängt, und nicht von den Werten des Potentials in zwischenliegenden Punkten, und dass folglich die verrichtete Arbeit dieselbe ist, gleichviel, auf welchem Wege der Körper sich von Q nach P bewegt. Ebenso verhält es sich mit dem Aufwande an Energie. Wird ein Kilogramm der anziehenden Kraft der Erde entgegen von einem Punkte nach einem andern höher gelegenen gehoben, so ist der Aufwand an Energie derselbe, auf welchem Wege das Kilo auch emporgehoben werden möge.

261. Elektrische Kraft. Die Definition von »Arbeit« ist: Produkt aus der überwundenen Kraft und dem Wege, auf welchem die Kraft überwunden ist, oder **Arbeit = Kraft × Weg**, auf welchem dieselbe überwunden wird.

Wenn also die Potentialdifferenz zwischen 2 Punkten die Arbeit ist, welche verrichtet wird, um unsere + Einheit von

dem einen Punkte zum andern zu bewegen, so folgt, dass die mittlere *elektrische Kraft* zwischen jenen Punkten gefunden wird, wenn man die verrichtete Arbeit durch den Abstand dieser Punkte dividiert, oder $\frac{V_P - V_Q}{PQ} = f$ (gleich der mittleren elektrischen Kraft längs der Linie PQ). Die (mittlere) elektrische Kraft ist daher das Verhältnis der Zu- oder Abnahme des Potentials pro Längeneinheit. Liegen P und Q nahe zusammen, so ist die Kraft thatsächlich zwischen P und Q gleichförmig. Für die Kraft in einem elektrischen Felde gebraucht man bisweilen den Ausdruck: *elektromotorische Intensität.*

262. Oberflächen von gleichem Potential. Eine auf einer kleinen Kugel angesammelte elektrische Ladung wirkt auf äussere Körper so, als ob die ganze Ladung im Mittelpunkte der Kugel vereinigt wäre [1]). Wir haben gesehen, dass die von einer solchen Ladung ausgeübte Kraft in einiger Entfernung von der Kugel abnimmt, indem die Kraft in demselben Verhältnisse abnimmt, wie das Quadrat der Entfernung zunimmt. Doch ist die Kraft gleich gross in allen Punkten, welche von der kleinen geladenen Kugel gleich weit entfernt sind. Ebenso ist das Potential dasselbe in allen Punkten, welche von der geladenen Kugel gleich weit entfernt sind. Wenn der Punkt A (Fig. 138) die mit q Einheiten der Elektrizität geladene Kugel vorstellt, so ist das Potential im Punkte P, welches wir V_P nennen wollen, gleich $\frac{q}{r}$, wo r die Entfernung zwischen A und P bedeutet. Nehmen wir irgend einen andern Punkt in derselben Entfernung von A, so ist sein Potential ebenfalls $\frac{q}{r}$. Nun liegen

1) Der Leser muss beachten, dass dies nicht mehr richtig ist, wenn andere Ladungen der Kugel genähert werden, denn in diesem Falle ist die Elektrizität nicht mehr gleichförmig über ihre Oberfläche verteilt. Aus diesem Grunde haben wir bei der Beschreibung der Messung elektrischer Kräfte mit der Drehwage gesagt, dass »die Kugeln im Vergleich zum Abstande derselben sehr klein sein müssten«.

alle Punkte, welche von A denselben Abstand wie P haben, auf der Oberfläche einer Kugel, deren Mittelpunkt in A liegt, und welche in Fig. 140 durch den durch P gezogenen Kreis

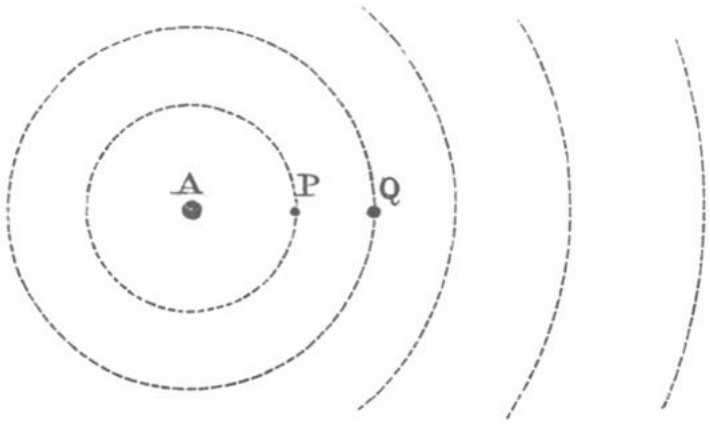


Fig. 140.

dargestellt wird. Auf diesem ganzen Kreise hat das Potential gleiche Werte, und dieser Kreis stellt daher eine **Oberfläche** von **gleichem Potential** dar. Die Arbeit, welche verrichtet werden muss, um eine + Einheit aus unendlicher Entfernung herbei zu schaffen, ist dieselbe, gleichviel, bis zu welchem Punkte dieser Oberfläche von gleichem Potential die Einheit bewegt wird; und um dieselbe von einem Punkte der Oberfläche bis zu einem andern Punkte derselben zu bewegen, ist keine weitere Ueberwindung der elektrischen Kräfte erforderlich, und bedarf daher keines weitern Aufwandes an Arbeit. In einer andern Entfernung, z. B. im Punkte Q, hat das Potential einen andern Wert, und es lässt sich durch diesen Punkt eine andere Oberfläche von gleichem Potential legen. Nehmen wir an, dass wir die Entfernung des Punktes Q von P so wählten, dass es eines Aufwandes gerade einer *Arbeitseinheit* (in Betreff der Definition einer Arbeitseinheit vergleiche man die Anmerkung über Einheiten am Schlusse dieser Vorlesung) bedürfte, um eine Einheit positiver Elektrizität der abstossenden Kraft von A entgegen zu bewegen, so haben wir die *Einheit der Potentialdifferenz* zwischen den durch Q und P gelegten Oberflächen, und es ist eine *Arbeitseinheit* erforderlich, um eine + Einheit von einem Punkte

der einen Oberfläche nach einem beliebigen Punkte der andern Oberfläche zu bewegen. Auf gleiche Weise könnten wir ein ganzes *System* von Flächen gleichen Potentials um den Punkt A konstruieren, indem wir sie in solchen Entfernungen nehmen, dass zwischen jeder von ihnen und der nächstfolgenden eine Einheit der Potentialdifferenz liegt. Die Abstände derselben würden immer grösser werden, denn da die Kraft abnimmt, je weiter man sich von A entfernt, so hat die + Einheit, um eine Arbeitseinheit zu verrichten, einen längern Weg zurückzulegen, der immer schwächer werdenden entgegenwirkenden Kraft entgegen.

Die Gestalt der Oberflächen gleichen Potentials um zwei kleine elektrische Körper, welche nahe bei einander liegen, würde nicht kugelförmig sein; und die Oberflächen gleichen Potentials um eine Anzahl nahe bei einander befindlicher elektrischer Körper würde von sehr unregelmässiger Gestalt sein.

263. Kraftlinien. Die elektrische Kraft, ob anziehend oder abstossend, wirkt in den Oberflächen gleichen Potentials stets senkrecht zur Oberfläche. Diejenigen Linien, welche die Richtung der resultierenden elektrischen Kräfte angeben, nennt man bisweilen elektrische Kraftlinien. Für den Fall einer einzelnen elektrischen Kugel würden die Kraftlinien gerade Linien sein, nämlich die Radien des Systems der Oberflächen gleichen Potentials. Im Allgemeinen sind jedoch die Kraftlinien krumme Linien; in diesem Falle würde die Resultierende in einem beliebigen Punkte die Richtung der Tangente haben, welche sich in diesem Punkte an die Kurve legen lässt. Zwei Kraftlinien können sich nicht durchschneiden, denn die Resultierende in einem Punkte kann nicht gleichzeitig nach zwei Richtungen wirken. Die positive Richtung längs einer Kraftlinie ist diejenige Richtung, nach welcher ein kleiner mit + Elektrizität geladener Körper durch die elektrische Kraft getrieben würde, wenn derselbe frei beweglich wäre. Ein von einer Anzahl von Kraftlinien begrenzter Raum wird bisweilen ein *Kraftkanal* genannt. So kann man sich z. B. den ganzen Raum rings um eine kleine isolierte elektrische Kugel in eine Anzahl kegelförmiger

Kanäle geteilt denken, von denen jeder seine Spitze im Mittelpunkte der Kugel hat. Die gesamte elektrische Kraft, welche durch einen beliebigen Querschnitt eines Kraftkanals hindurch ausgeübt wird, ist konstant, gleichviel, an welcher Stelle man den Querschnitt nimmt.

264. Potential innerhalb eines geschlossenen Konduktors. Die in den Art. 32 bis 36 angeführten Versuche beweisen mit grosser Bestimmtheit, dass *innerhalb eines geschlossenen Konduktors keine elektrische Kraft* existiert, welche von äussern Ladungen oder solchen auf der Oberfläche des Konduktors herrührt. Nun haben wir oben nachgewiesen, dass die elektrische Kraft die Zu- oder Abnahme des Potentials pro Längeneinheit ist. Ist keine elektrische Kraft vorhanden, so hat man auch keine Zu- oder Abnahme des Potentials. Das Potential innerhalb eines geschlossenen Konduktors (z. B. innerhalb einer hohlen Kugel) ist daher für alle Punkte des Innern konstant, nämlich dasselbe wie das Potential der Oberfläche. *Die Oberfläche eines geschlossenen Konduktors ist daher notwendig eine Oberfläche gleichen Potentials.* Wäre dieselbe nicht von ein und demselben Potential, so würde ein Abfliessen der Elektrizität vom höhern Potential zu dem niedrigeren stattfinden, wodurch sofort Gleichgewicht hergestellt und die ganze Oberfläche auf ein Potential gebracht würde. Der Leser hat sorgfältig zwischen der Oberflächendichte in einem Punkte und dem Potential jenes Punktes zu unterscheiden, welches von benachbarten elektrischen Ladungen herrührt. Wird ein elektrischer Körper in die Nähe eines isolierten Konduktors gebracht, so wissen wir, dass die entgegengesetzten Enden desselben induzierte Ladungen entgegengesetzter Art aufweisen, und doch hat das Ganze dasselbe Potential. Wäre die + Ladung des Konduktors von der — Ladung nicht durch eine Bewegung der Elektrizität von dem einen Ende zum andern geschieden, so würden diese beiden Enden wegen ihrer ungleichen Entfernung eine Potentialdifferenz aufweisen. Dies ist aber ein Zustand, der in dem Konduktor nicht andauern kann, denn infolge der Potentialdifferenz würde die Elektrizität so lange fliessen,

bis das von dem elektrischen Körper *und den induzierten Ladungen* herrührende Potential in jedem Punkte des Konduktors gleich gross wäre.

Das Potential in irgend einem Punkte einer leitenden (hohlen oder festen) Kugel, welches von einem ausserhalb gelegenen elektrischen Körper A (Fig. 141) herrührt, ist gleich der in A befindlichen elektrischen Menge q, dividiert durch den Abstand des A vom Zentrum B der Kugel; denn das Potential, welches q in B hervorruft, ist $\frac{q}{r}$, wo $r = AB$ ist, und folglich haben wir in allen Punkten in der Kugel dasselbe Potential.

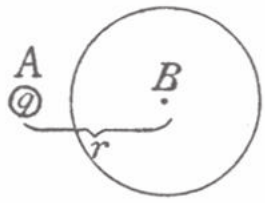


Fig. 141.

Die Erde ist eine grosse leitende Kugel. Demnach ist ihr Potential, welches eine in der Nähe ihrer Oberfläche befindliche positive Ladung q bewirkt, gleich $\frac{q}{r}$, wo r als ein Erdradius genommen werden kann, also $r = 636{,}000{,}000$ Zentimeter Aber es ist unmöglich, eine $+$ Ladung q zu erzeugen, ohne gleichzeitig eine ebenso grosse $-$ Ladung hervorzurufen; daher ist das Potential der Erde, welches von beiden Ladungen herrührt, $\frac{q}{r} - \frac{q}{r} = 0$.

265. Das Gesetz der umgekehrten Quadrate. Eine wichtige Folgerung ergiebt sich aus dem Nichtvorhandensein einer elektrischen Kraft innerhalb eines geschlossenen Konduktors. Diese Thatsache setzt uns in den Stand, die notwendige Wahrheit des Gesetzes der umgekehrten Quadrate nachzuweisen, welches zuerst experimentell, obgleich nur annähernd, von Coulomb mittelst der Torsionswage nachgewiesen wurde. Denken wir uns einen Punkt P irgendwo innerhalb einer hohlen, mit Elektrizität geladenen Kugel (Fig. 142). Die Ladung ist über die ganze Kugel gleichmässig

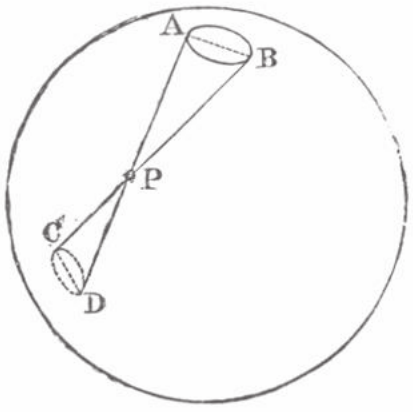


Fig. 142.

verteilt und die Elektrizitätsmenge auf einem kleinen Teile ihrer Oberfläche ist dem Flächeninhalte desselben proportional. Betrachten wir einen kleinen Teil AB der Oberfläche. Die Ladung auf AB würde eine +, in P befindliche Einheit mit einer gewissen Kraft abstossen. Wir ziehen nun durch P die Linien AD und BC, und betrachten diese als die Grenzen eines kleinen Doppelkegels, dessen Spitze in P liegt; die kleine Fläche CD stellt die Begrenzung des untern Kegels dar, und die Elektrizität auf CD wirkt ebenfalls auf die in P befindliche + Einheit und stösst dieselbe ab. Nun sind diese Oberflächen AB und CD und ihre Ladungen den *Quadraten* ihrer bezüglichen Abstände von P direkt proportional. Heben sich also die Kräfte, welche sie auf P ausüben, genau gegenseitig auf (wie der Versuch es zeigt), so ist klar, dass die elektrische Kraft im *umgekehrten Verhältnis der Quadrate der Entfernungen* abnehmen muss; denn die ganze Oberfläche der Kugel können wir uns durch Kegel, deren Spitzen in P liegen, zerlegt denken. Diese Schussweise lässt sich auch auf hohle Konduktoren von beliebiger Gestalt ausdehnen.

266. Kapazität. In der vierten Vorlesung wurde der Leser mit einigen elementaren Begriffen über die Kapazität der Konduktoren bekannt gemacht. Wir sind jetzt so weit vorgeschritten, um die genaue Definition geben zu können. Die elektrostatische **Kapazität** eines Konduktors wird *gemessen durch die Elektrizitätsmenge, welche ihm mitgeteilt werden muss, um sein Potential von Null bis zur Einheit zu erhöhen.* Ein kleiner Konduktor, wie z. B. eine isolierte Kugel von der Grösse einer Erbse, bedarf noch nicht einer elektrischen Einheit, um sein Potential von 0 auf 1 zu erhöhen; seine Kapazität ist deshalb gering — während eine grosse Kugel auch eine grosse Menge erfordert, um ihr Potential bis zu demselben Grade zu erhöhen, und wir würden ihr deshalb eine grosse Kapazität beizulegen haben. Bezeichnet C die Kapazität und Q eine Elektrizitätsmenge, so ist

$$C = \frac{Q}{V} \text{ und } CV = Q.$$

In Worten heisst dies: Die Elektrizität, welche erforderlich ist,

um einen gegebenen Konduktor bis zu einem gegebenen Potential zu laden, ist numerisch gleich dem Produkte der Kapazität und des Potentials, bis zu welchem derselbe gebracht wird. Die Kapazität eines isolierten Körpers wird durch in der Nähe befindliche Konduktoren beeinflusst. Wenn man von der Kapazität eines Körpers spricht, so meint man einen isolierten und ausserdem gesondert aufgestellten Körper.

267. Die Einheit der Kapazität. Von einem Konduktor, welcher bloss eine Einheit Elektrizität erforderte, damit sein Potential von 0 auf 1 erhöht würde, würden wir sagen, dass er *die Einheit der Kapazität* besitzt. Eine Kugel von einem Zentimeter Radius besitzt die Einheit der Kapazität; denn wird dieselbe mit einer Menge gleich der Einheit geladen, so wirkt diese Ladung so, als ob sie im Mittelpunkte der Kugel vereinigt wäre. An ihrer Oberfläche, welche vom Mittelpunkte einen Zentimeter entfernt ist, ist das Potential, welches durch $\frac{q}{r}$ gemessen wird, gleich eins. Da nun die Menge eins die Kugel auf ein Potential 1 bringt, so besitzt diese also die Einheit der Kapazität. *Die Kapazität von Kugeln sind ihren Radien proportional.* Denken wir uns die Ladung q (Fig. 141) der Kugel näher und näher gebracht, bis dieselbe die Oberfläche erreicht, so wird r gleich dem Radius der Kugel. Denken wir uns ferner die Oberfläche vollständig mit kleinen Mengen q belegt, so dass wir eine gleichförmig verteilte Gesamtladung Q haben. Jede kleine Menge würde der Kugel das Potential $\frac{q}{r}$ erteilen und das gesamte Potential der Kugel, herrührend von der auf ihrer Oberfläche befindlichen Ladung Q, würde gleich $\frac{Q}{r}$ sein. Je grösser die Kugel ist, desto geringer würde bei derselben Ladung Q das Potential in irgend einem Punkte sein. So z. B. müsste einer Kugel von 100 cm Radius eine Ladung von 100 Einheiten erteilt werden, um ihr Potential auf 1 zu erhöhen. Demnach hat eine Kugel von einem Meter Radius eine

Kapazität gleich 100. Die Erde hat eine Kapazität von ungefähr 630 Millionen (in elektrostatischen Einheiten) oder circa 700 Mikrofarad. Die Kapazitäten von Konduktoren, welche eine andere Gestalt haben, zu berechnen, ist fast unmöglich. Es ist zu beachten, dass die Kapazität einer Kugel, wie im obigen Falle, nur dann ihre Kapazität wirklich ausdrückt, wenn sie von andern Konduktoren oder elektrischen Ladungen sehr weit entfernt ist. Die Kapazität eines Konduktors wird erhöht, wenn man demselben eine Ladung entgegengesetzter Art nahe bringt, denn das Potential an der Oberfläche des Konduktors ist die Summe des Potentials, welches von seiner eigenen Ladung herrührt, und des Potentials von entgegengesetztem Zeichen, welches von der benachbarten Ladung herrührt. Um daher das resultierende Potential auf die Einheit zu erheben, muss demselben eine grössere elektrische Menge zugeführt werden, oder mit andern Worten, seine Kapazität ist grösser. Dies ist die richtige Erklärung der Wirkungsweise der Leydener Flasche und anderer Akkumulatoren, und der Leser darf dies nicht ausser Acht lassen, wenn er in der 23. Vorlesung zur Betrachtung der Theorie der Akkumulatoren schreitet.

268. Oberflächendichte [1]). Diesen Ausdruck wandte Coulomb an, um damit die Elektrizitätsmenge auf der Flächeneinheit in irgend einem Punkte einer Oberfläche zu bezeichnen. In der 4. Vorlesung wurde erwähnt, dass eine elektrische Ladung

---

1) Bisweilen gebraucht man das Wort Spannung für denjenigen Begriff, welcher hier genau nach Coulomb definiert ist. Der Ausdruck Spannung ist jedoch unglücklich gewählt; und derselbe wird in Lehrbüchern so häufig falsch angewendet (er bezeichnet hier nicht allein Oberflächendichte, sondern auch Potential, und sogar elektrische Kraft, d. h. die mechanische Kraft, welche die Elektrizität auf einen materiellen Körper ausübt), so dass wir den Ausdruck überhaupt vermeiden. Von grossem Werte würde derselbe dann sein, wenn wir denselben annehmen könnten, um bloss die von angehäuften Ladungen herrührende mechanische Spannung längs eines dielektrischen Körpers zu bezeichnen; so lange jedoch die oben erwähnte Konfusion besteht, ist es besser, den Ausdruck überhaupt ganz fallen zu lassen, und der Leser hat eine Sache weniger zu lernen — und zu verlernen.

sich niemals gleichförmig auf einem Konduktor verteilt, der Fall einer isolierten Kugel ausgenommen. Ist die Verteilung ungleich, so kann die Dichte in irgend einem Punkte der Oberfläche dadurch ausgedrückt werden, dass man diejenige elektrische Menge betrachtet, welche auf einer kleinen Flächeneinheit in jenem Punkte vorhanden ist. Bedeutet Q die auf der kleinen Oberfläche befindliche Elektrizität, und S den Inhalt der kleinen Oberfläche, so ist die Oberflächendichte ρ durch die Gleichung gegeben:

$$\rho = \frac{Q}{S}.$$

In trockener Luft ist die Grenze der möglichen Elektrisierung erreicht, wenn die Dichte den Wert von ungefähr 20 elektrischen Einheiten pro Quadratzentimeter erreicht. Wird ein Körper in höherm Grade elektrisiert, so entweicht die Elektrizität in die Luft in Gestalt von »Funken« und »Strahlenbüscheln«. In dem Falle einer *gleichmässigen* Verteilung auf einer Oberfläche (wie z. B. bei der Kugel oder wie sie annähernd auch bei einer flachen Scheibe erreicht werden kann, um welche ein unter dem Namen »Schutzring« bekannter Ring gelegt ist) findet man die Dichte, indem man die gesamte Menge der Ladung durch die ganze Oberfläche dividiert.

269. Oberflächendichte auf einer Kugel. Die Oberfläche einer Kugel vom Radius r ist gleich $4\pi r^2$. Wird dieser Kugel also die Ladung Q erteilt, so ist die Oberflächendichte an jeder Stelle der Kugel $\rho = \frac{Q}{4\pi r^2}$, oder, wenn wir die Oberflächendichte kennen, so ist die Ladung $Q = 4\pi r^2 \rho$.

Die Oberflächendichte auf *2 Kugeln*, welche durch einen dünnen Draht verbunden sind, ist von besonderer Wichtigkeit. Sind die Kugeln ungleich, so verteilen sich die Ladungen auf ihnen im Verhältnis ihrer Kapazitäten (vergl. Art. 40), d. h. im Verhältnis ihrer Radien. Sind die Radien der Kugeln gleich 2 und 1, so ist auch das Verhältnis ihrer Ladungen wie 2 zu 1. Ihre resp. Dichtigkeiten findet man aber, indem man die Elektrizitätsmenge auf jeder Kugel durch ihre Oberfläche dividiert.

Die Oberflächen sind aber den Quadraten der Radien proportional, verhalten sich also wie 4 : 1 ; folglich verhalten sich die Dichtigkeiten wie 1 : 2 oder *umgekehrt wie die Radien.* Ist nun eine dieser Kugeln sehr klein — nicht grösser als ein Punkt — so ist die Dichte auf derselben verhältnismässig unendlich gross, so gross, dass die Luftteilchen, welche mit derselben in Berührung kommen, die Ladung durch Leitung schnell weiter führen. Hieraus erklärt sich die *Wirkung von* **Spitzen** beim Ausladen von Konduktoren, worauf im ersten Kapitel, Art. 38, 45 und 47 hingewiesen wurde.

270. Elektrische Bilder. Bringt man q + elektrische Einheiten in einen Punkt in der Nähe einer nicht isolierten leitenden Kugel vom Radius r, im Abstande d von ihrem Mittelpunkte, so lässt sich mathematisch nachweisen, dass die negative induzierte Ladung $-\frac{r}{d} . q$ beträgt, und über den nächsten Teil der Kugeloberfläche so verbreitet ist, dass die Oberflächendichte dem Kubus der Entfernung jenes Punktes umgekehrt proportional ist. Kelvin wies nach, dass in Betreff aller äussern Punkte das Potential dieser besondern Verteilung auf der Oberfläche genau dasselbe ist, als wenn diese ganze negative Ladung in einem innern Punkte im Abstande $r - \frac{r^2}{d}$ hinter der Oberfläche vereinigt wäre. Einen solchen Punkt können wir als das virtuelle Bild des äussern Punktes ansehen, gerade so wie wir in der Optik gewisse Punkte hinter den Spiegeln als die virtuellen Bilder der äussern Punkte ansehen, von denen die Lichtstrahlen ausgehen. Maxwell stellte die folgende **Definition** für ein elektrisches Bild auf: *Ein elektrisches Bild ist ein elektrischer Punkt (oder Punktesystem) auf einer Seite einer Oberfläche, welcher auf der andern Seite jener Oberfläche dieselbe elektrische Wirkung hervorbringen würde, welche die thatsächliche Elektrisierung jener Oberfläche wirklich hervorbringt.* Steht die Kugel mit der Erde nicht in Verbindung, und wäre sie nicht elektrisch, bevor ihr die Ladung + q genähert würde, so können wir die Oberflächen-

dichte in irgend einem Punkte auf folgendem Wege bestimmen. Nehmen wir an, dass auf der Kugel gleichzeitig zwei Ladungen, $+\frac{rq}{d}$ und $-\frac{rq}{d}$, vorhanden wären, erstere gleichmässig verteilt, letztere so, dass ihre Oberflächendichte umgekehrt proportional dem Kubus der Entfernung von dem elektrischen Punkte wäre. Dann ist die wirkliche Oberflächendichte gleich der algebraischen Summe dieser beiden. Eine + elektrische Ladung, welche einen Zentimeter von einer dünnen Metallscheibe entfernt ist, induziert auf derselben eine negative Ladung, welche sich auf das benachbarte Gebiet der Scheibe verteilt (mit einer Dichtigkeit, welche dem Kubus des Abstandes von jenem Punkte umgekehrt proportional ist); aber die elektrische Wirkung dieser Verteilung würde genau durch ihr »Bild« dargestellt, nämlich durch eine gleich grosse Menge negativer Elektrizität, die sich einen Zentimeter hinter der Scheibe befindet. Man hat vielfache schöne mathematische Anwendungen dieser Methode gemacht, welche es ermöglicht, die Verteilung in schwierigen Fällen zu berechnen, wie z. B. die Verteilung der Ladung an der innern Fläche einer Hohlkugel.

271. Die Kraft in der Nähe einer geladenen Kugel. Weiter oben hat sich ergeben, dass die Elektrizitätsmenge Q, welche sich auf einer bis zur Oberflächendichte ρ geladenen Kugel befindet,

$$Q = 4\pi r^2 \cdot \rho$$

ist, und es ist jetzt die Aufgabe zu lösen, die Kraft zu finden, welche diese Ladung auf eine positive elektrische Einheit ausübt, die sich in einem der Oberfläche der Kugel unendlich nahe liegenden Punkte befindet. Die Ladung auf der Kugel wirkt so, als ob sie im Mittelpunkte vereinigt wäre. Der Abstand zwischen den beiden Mengen ist also $= r$, und nach dem Coulomb'schen Gesetze ist die Kraft $f = \frac{Q \times 1}{r^2} = \frac{4\pi r^2 \rho}{r^2}$ $= 4\pi\rho$.

Dieses wichtige Ergebnis lässt sich auf folgende Weise in

Worten ausdrücken: *Die Kraft (in Dyn gemessen), welche eine geladene Kugel auf eine ihrer Oberfläche unendlich nahe befindliche Einheit der Elektrizität ausübt, ist numerisch gleich der Oberflächendichte der Ladung, multipliziert mit der Zahl* 4π.

272. Die Kraft in der Nähe einer geladenen Platte von unbegrenzter Ausdehnung. Angenommen, eine Platte von unbegrenzter Ausdehnung sei so geladen, dass sie die Oberflächendichte ρ hat. Die Oberflächendichte ist gleichmässig, da die Kanten der Platte so weit entfernt sein sollen, dass dieselben keinen Einfluss ausüben. Dann lässt sich nachweisen, *dass die Kraft, welche eine solche Platte auf eine Einheit an irgend einer Stelle ihrer Nachbarschaft ausübt, numerisch (in Dyn) durch* $2\pi\rho$ *ausgedrückt wird.* Dieser Ausdruck nimmt auf den entgegengesetzten Seiten der Platte verschiedene Vorzeichen an, und ist $+$ auf der einen und $-$ auf der andern Seite der Platte, da in dem einen Falle die Kraft das Bestreben hat, die Einheit von rechts nach links zu bewegen, im andern Falle von links nach rechts. Wir müssen deshalb beachten, dass der Wert der Kraft sich um $4\pi\rho$ ändert, wenn der Punkt durch die Fläche hindurchgeht. Dasselbe galt von der geladenen Kugel, wo die Kraft ausserhalb $= 4\pi\rho$ und innerhalb $= 0$ war. Dasselbe gilt von allen geladenen Oberflächen. Diese beiden Sätze sind in der Theorie der Elektrostatik von der grössten Wichtigkeit.

273. Der elementare geometrische Beweis des letzteren Satzes ist folgender:

Es wird die elektrische Kraft gesucht, welche in irgend einem Punkte in beliebiger. Entfernung von einer Ebene von unendlich grosser Ausdehnung wirkt, welche bis zur Oberflächendichte ρ geladen ist.

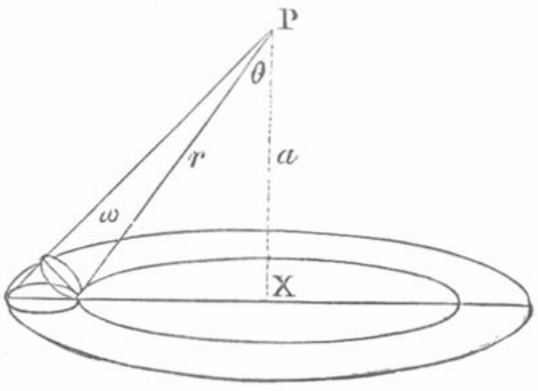


Fig. 143.

Es sei P der Punkt und $PX = a$ das Lot auf die Ebene. Dann betrachte man einen kleinen Kegel, dessen Spitze in

P liegt. Es sei ω der Flächenwinkel dieses Kegels, r die Länge desselben und Θ der Winkel, welchen seine Achse mit a einschliesst. Der Kegel trifft die Ebene schief und konstruiert man hier einen geraden Querschnitt, so ist der Winkel beider Querschnitte $= \Theta$. Nun ist der Flächenwinkel ω zufolge der Definition

$$\omega = \frac{\text{Fläche des geraden Querschnitts}}{r^2},$$

folglich die Fläche des schiefen Querschnitts $= r^2\omega \times \frac{1}{\cos\Theta}$,

mithin die Ladung auf dem schiefen Querschnitte $= \frac{r^2\omega\rho}{\cos\Theta}$; befände sich also in P eine positive elektrische Einheit, so würde diese kleine Ladung auf dieselbe eine Kraft ausüben $= \frac{r^2\omega\rho}{\cos\Theta} \cdot \frac{1}{r^2}$

$= \frac{\omega\rho}{\cos\Theta}$.

Nun zerlege man diese Kraft in 2 Teile, von denen der eine längs der Ebene, der andere längs a, senkrecht zur Ebene wirkt.

Die Normalkomponente längs a ist $\cos\Theta \cdot \frac{\omega\rho}{\cos\Theta} = \omega\rho$

Denkt man sich dann die ganze Ebene auf ähnliche Weise in kleine Flächen zerlegt, so ergeben sich lauter kleine Kegel, deren Spitzen in P sind. Betrachtet man eine unendliche grosse Zahl solcher kleinen Kegel, die überall an einander stossen, und zerlegt ihre Kräfte auf ähnliche Weise, so ergiebt sich, dass die Komponenten längs der Ebene sich gegenseitig aufheben, während die Normalkomponenten, oder die längs a wirkenden Kräfte, gleich der Summe ihrer sämtlichen Flächenwinkel sind, multipliziert mit der Oberflächendichte; oder

$$\text{Gesamtresultierende längs } a = \Sigma\omega\rho.$$

Nun ist aber der gesamte Flächenwinkel zwischen einem Punkte und einer unendlich grossen Ebene $= 2\pi$, denn derselbe umfasst eine ganze Halbkugel; folglich

$$\text{Gesamtresultierende} = 2\pi\rho.$$

274. Elektrische Spannung des Mediums. In jedem

elektrischen Felde (Art. 13) ist eine *Spannung* längs der elektrischen Kraftlinien vorhanden, in Verbindung mit einem gleich starken *Druck*, der überall rechtwinklig zu jenen Linien ist. Bezeichnet F die resultierende elektrische Kraft auf eine in irgend einem Punkte des Feldes befindliche + Einheit (d. h. die elektromotorische Intensität jenes Punktes), so ist die Spannung gleich $F^2 : 8\pi$ (Dyn pro Quadratzentimeter). In solchen Medien, deren dielektrische Kapazität grösser als 1 ist, ist auch die Spannung verhältnismässig grösser. In Betreff der optischen Wirkungen dieser Spannungen, vergl. Art. 520.

Anmerkung über fundamentale und abgeleitete Einheiten.

275. Fundamentale Einheiten. Alle physikalischen Grössen, wie Kraft, Geschwindigkeit etc., lassen sich mit Hilfe der 3 fundamentalen Grössen: Länge, Masse und Zeit, ausdrücken. Jede dieser Grössen muss durch eine besondere Einheit gemessen werden.

Dasjenige Einheitssystem, welches fast einstimmig angenommen wurde und in diesen Vorlesungen ausschliesslich zur Anwendung gelangt, ist das sogenannte »Zentimeter-Gramm-Sekunden«-System, bei welchem die fundamentalen Einheiten sind:

Das Zentimeter als Einheit der *Länge.*
Das Gramm als Einheit der *Masse.*
Die Sekunde als Einheit der *Zeit.*

Das Zentimeter ist der tausendmillionte Teil $\left(= \frac{1}{1{,}000{,}000{,}000}\right)$ eines Erdquadranten.

Das Meter ist 100 Zentimeter.

Das Kilometer ist 1000 Meter.

Das Millimeter ist der zehnte Teil eines Zentimeters.

Das Gramm ist das Gewicht eines Kubikzentimeters Wasser bei 4° C.

Das Kilogramm ist 1000 Gramm.

276. Abgeleitete Einheiten.

Fläche. Die Flächeneinheit ist das Quadratzentimeter.

Volumen. Die Volumeneinheit ist das Kubikzentimeter.

Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeitseinheit ist die Geschwindigkeit eines Körpers, der den Weg 1 in der Zeit 1 zurücklegt, oder *die Geschwindigkeit eines Zentimeters pro Sekunde.*

Beschleunigung. Die Einheit der Beschleunigung ist diejenige Beschleunigung, welche einem Körper in der Zeit 1 die Geschwindigkeit 1 erteilt, oder eine Beschleunigung von einem Zentimeter pro Sekunde in jeder Sekunde. Die Beschleunigung der Schwerkraft erteilt in einer Sekunde eine bedeutend grössere Geschwindigkeit, denn die Geschwindigkeit, welche sie freifallenden Körpern erteilt, beträgt ungefähr 981 Zentimeter pro Sekunde. Dieser Wert ist in verschiedenen Breiten ein etwas anderer. In Berlin ist der Wert der Beschleunigung der Schwerkraft $g = 981{,}2$; am Aequator $g = 978{,}1$; am Nordpole $g = 983{,}1$.

Kraft. Die Krafteinheit ist diejenige Kraft, welche einer Masse von einem Gramm, während einer Wirkungsdauer von einer Sekunde, eine Geschwindigkeit von einem Zentimeter pro Sekunde erteilt. Die Krafteinheit heisst *Dyn.* Die Kraft, mit welcher die Erde eine Masse anzieht, heisst gewöhnlich das »Gewicht« dieser Masse, und der Wert desselben ist offenbar an verschiedenen Punkten der Erdoberfläche verschieden. Die Kraft, mit welcher ein Körper gravitiert, d. h. sein Gewicht (in Dyn), wird gefunden, indem man seine Masse (in Gramm) mit dem Werte von g für den besondern Ort, wo die Kraft ausgeübt wird, multipliziert.

Arbeit. Die Arbeitseinheit ist diejenige Arbeit, welche verrichtet wird, wenn man die Krafteinheit auf einem Wege von der Längeneinheit überwindet, d. h. wenn man einen Körper einen Zentimeter weit gegen eine Kraft von einem Dyn bewegt. Die Arbeitseinheit heisst *Erg.* Da das »Gewicht« eines Gramm $= 1 \times 981 = 981$ Dyn ist, so beträgt die Arbeit, welche verrichtet wird, wenn ein Gramm einen Zentimeter hoch der Schwerkraft entgegengehoben wird, 981 *Erg.*

Energie. Die Einheit der Energie ist ebenfalls das Erg;

denn die Energie eines Körpers wird durch die Arbeit gemessen, welche er verrichten kann.

Wärme. Die Wärmeeinheit (bisweilen Calorie genannt) ist diejenige Wärmemenge, welche erforderlich ist, um 1 Gramm Wasser von 0° bis 1° (C.) zu erwärmen; und das mechanische Aequivalent dieser Wärmemenge ist 42 Millionen Erg. Dieses ist der Wert des Joule'schen Aequivalentes, ausgedrückt in absolutem Maße (C.G.S.). Vergl. auch Art. 434.

Diese Einheiten werden bisweilen »absolute« Einheiten genannt; wobei der von Gauss eingeführte Ausdruck absolut bedeutet, dass sie von der Gösse irgend eines besondern Instrumentes oder von dem Werte der Schwere an einem bestimmten Orte, sowie von andern willkürlichen Grössen unabhängig sind, ausgenommen von den 3 Normalmaßen der Länge, der Masse und der Zeit. Es ist jedoch besser, den geeigneteren Namen C.G.S. Einheiten auf sie anzuwenden, da sie vom Zentimeter, vom Gramm und von der Sekunde abgeleitet werden.

277. Elektrische Einheiten. Man unterscheidet zwei Systeme elektrischer Einheiten, welche von den fundamentalen C.G.S. Einheiten abgeleitet werden, von denen das eine von der Kraft ausgeht, welche zwischen 2 elektrischen Mengen ausgeübt wird, das andere dagegen von der Kraft, welche 2 Magnetpole auf einander ausüben. Das erste System heisst die *elektrostatischen* Einheiten, das zweite die *elektromagnetischen* Einheiten. Die wichtige Beziehung zwischen beiden Systemen ist im 5. Kapitel erläutert.

278. Elektrostatische Einheiten. Für die elektrostatischen Einheiten der Menge, des Potentials, der Kapazität etc. hat man keine besonderen Namen. Weshalb man die folgenden Werte als Einheiten angenommen hat, geht teils aus dem ersten, teils aus diesem Kapitel hervor.

Einheit der Menge. Die Einheit der Menge ist diejenige Elektrizitätsmenge, welche in einer Entfernung von einem Zentimeter von einer gleichen und gleichartigen Menge dieselbe mit einer Kraft von einem Dyn abstösst.

Potential. Da das Potential durch die Arbeit gemessen wird,

welche verrichtet wird, wenn eine Einheit positiver Elektrizität den elektrischen Kräften entgegen bewegt wird, so wird die Einheit des Potentials durch die Einheit der Arbeit, das Erg, gemessen.

Einheit der Potentialdifferenz. Die Einheit der Potentialdifferenz besteht zwischen 2 Punkten, wenn eine Arbeitseinheit aufgewendet werden muss, um eine Einheit positiver Elektrizität der elektrischen Kraft entgegen von einem Punkt zum andern zu bewegen.

Einheit der Kapazität. Derjenige Konduktor besitzt die Einheit der Kapazität, welcher eine Ladung von einer elektrischen Einheit erfordert, um auf die Einheit des Potentials zu gelangen. Eine Kugel von einem Zentimeter Radius besitzt die Einheit der Kapazität.

Die Spezifische Induktive Kapazität oder der dielektrische Koeffizient wird in Art. 290 als das Verhältnis zweier elektrischen Mengen definiert. Die spezifische induktive Kapazität der Luft wird als Einheit angenommen. Die elektromotorische Intensität ist die elektrische Kraft eines elektrischen Feldes in einem beliebigen Punkte und wird durch die Kraft gemessen, welche dasselbe auf die in jenem Punkte befindliche Ladung 1 ausübt.

Aus Zweckmässigkeitsgründen wollen wir hier noch die Regeln angeben, wonach die elektrostatischen Einheiten auf die praktischen (elektromagnetischen) zurückgeführt werden können, nämlich:

Potential. Um auf Volt zu reduzieren, multipliziere man mit 300.

Kapazität. Um auf Microfarad zu reduzieren, dividiere man durch 900,000.

Menge. Um auf Coulomb zu reduzieren, dividiere man durch 3×10^9.

Strom. Um auf Ampère zu reduzieren, dividiere man durch 3×10^9.

Widerstand. Um auf Ohm zu reduzieren, multipliziere man mit 9×10^{11}.

279. Dimensionen der Einheiten. Weiter oben haben wir vorausgesetzt, dass eine Geschwindigkeit in Zentimetern pro Sekunde ausgedrückt werden kann; denn die Geschwindigkeit

ist das Verhältnis der Ortsveränderung zu der dazu gebrauchten Zeit, und es ist klar, dass, wenn die Ortsveränderung als eine Länge in Zentimetern gemessen werden kann, die Geschwindigkeit durch die Anzahl der Zentimeter gemessen wird, um welche sich der Körper in der Zeiteinheit fortbewegt. Es ist in der That unmöglich, eine Geschwindigkeit auszudrücken, wofern man sie nicht als den Quotienten einer bestimmten Anzahl Längeneinheiten dividiert durch eine bestimmte Anzahl Zeiteinheiten betrachtet. Mit andern Worten: Geschwindigkeit $= \frac{\text{Länge}}{\text{Zeit}}$; oder, wenn wir L als Länge und T als Zeit nehmen, $V = \frac{L}{T}$, wofür wir noch passender schreiben $V = L \,.\, T^{-1}$.

Da die Beschleunigung das Verhältnis der Geschwindigkeitsänderung zu der dazu erforderlichen Zeit ist, so haben wir in analoger Weise: $A = \frac{V}{T} = \frac{L}{T \,.\, T} = \frac{L}{T^2} = L \,.\, T^{-2}$. Nun sind diese physikalischen Grössen, »Geschwindigkeit« und »Beschleunigung« bezüglich immer Grössen derselben Art, gleichviel ob wir das Zentimeter oder den Zoll oder die Meile als Längeneinheit, oder die Sekunde oder ein beliebiges anderes Intervall als Zeiteinheit nehmen. Daher sagen wir, dass diese abstrakten Gleichungen die »Dimensionen« jener Grössen in Bezug auf die fundamentalen Grössen Länge und Zeit ausdrücken. Wie eine einfache Ueberlegung zeigt, ergeben sich folgende Werte für die Dimensionen der verschiedenen oben erwähnten Einheiten:

	Einheiten.	Dimension.
	Fundamentale:	
l	Länge	L
m	Masse	M
t	Zeit	T
	Abgeleitete:	
	Fläche $= L \times L =$	L^2
	Volumen $= L \times L \times L =$	L^3
v	Geschwindigkeit $= L : T =$	$L \cdot T^{-1}$
a	Beschleunigung = Geschwindigkeit : Zeit $=$	$L \cdot T^{-2}$
f	Kraft = Masse $\times$ Beschleunigung $=$	$M \cdot L \cdot T^{-2}$
	Arbeit = Kraft $\times$ Länge $=$	$M \cdot L^2 \cdot T^{-2}$
	Elektrostatische:	
q	Menge $= \sqrt{\text{Kraft} \times (\text{Entfernung})^2} =$	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}$
i	Strom = Menge : Zeit $=$	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-2}$
V	Potential = Arbeit : Menge $=$	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}$
R	Widerstand = Potential : Strom $=$	$L^{-1} T^{1}$
C	Kapazität = Menge : Potential $=$	L
k	Spec. Ind. Kapazität = Menge : andere Menge	eine Zahl
	Elektromotorische Intensität = Kraft : Menge	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}$

Die Dimensionen der magnetischen Einheiten findet man in der Anmerkung über magnetische Einheiten.

XXII. VORLESUNG: *Elektrometer.*

280. In der zweiten Vorlesung haben wir eine Anzahl von *Elektroskopen* oder solchen Apparaten beschrieben, mit deren Hilfe wir uns von dem Vorhandensein und der Art einer elektrischen Ladung überzeugen können; einige dieser Apparate

hatten auch den Zweck, die ungefähre Grösse dieser Ladungen anzugeben, keiner von ihnen, mit Ausnahme der Torsionswage, konnte jedoch als Instrument zur genauen Messung weder der *Grösse,* noch des *Potentials* einer gegebenen Ladung angesehen werden. *Ein Instrument, welches dazu dient, elektrostatische Potentialdifferenzen zu messen, heisst ein* **Elektrometer.** Solche Instrumente können auch dazu benutzt werden, um indirekt eine Elektrizitätsmenge zu messen, denn über die Grösse einer Ladung kann man sich dadurch Gewissheit verschaffen, dass man das Potential misst, auf welches sie einen Konduktor von bekannter Kapazität bringt. Die ersten Elektrometer versuchten die Elektrizitätsmengen direkt zu messen. Lane und Snow Harris konstruierten »Einheitsflaschen« d. h. kleine Leydener Flaschen, welche eine bestimmte Anzahl von Malen geladen und entladen wurden, wenn man eine bestimmte Elektrizitätsmenge messen wollte.

281. Abstossungs-Elektrometer. Die in Art. 18 beschriebene Torsionswage misst Elektrizitätsmengen durch die Kräfte, welche die der beweglichen und der festen Kugel erteilten Ladungen auf einander ausüben. Dieselbe kann nur zur Messung abstossender Kräfte benutzt werden, denn für den Fall einer anziehenden Kraft ist der Gleichgewichtszustand unbeständig.

Ausser dem in der zweiten Vorlesung beschriebenen Goldblattelektroskop und andern giebt es noch eine Anzahl feinerer Elektrometer, welche auf dem Prinzip der Abstossung beruhen, und von denen einige mit der Torsionswage Aehnlichkeit haben, insofern sie einen beweglichen, sich um eine zentrale Achse drehenden Arm haben. Unter ihnen verdienen die Elektrometer von Dellmann und Peltier Erwähnung. Bei diesem Apparate trägt ein leichter, auf einer Spitze schwebender Arm aus Aluminium einen kleinen Magnet, welcher ihn in den magnetischen Meridian einstellt. Ein fester, mit dem beweglichen in metallischer Berührung stehender Arm liegt ebenfalls in dem magnetischen Meridian. Eine diesem Apparate mitgeteilte Ladung erzeugt eine Abstossung zwischen dem festen und dem beweglichen Arme und veranlasst eine Winkelablenkung. Hier wird

jedoch die Kraft nicht durch die Gegenwirkung der Torsion eines elastischen Fadens gemessen, noch durch die der Schwerkraft, sondern durch die richtende Kraft des Erdmagnetismus, welcher auf die kleine Nadel wirkt. Nun ist diese von der Intensität der horizontalen Komponente des Erdmagnetismus an jenem Orte abhängig, ferner von dem magnetischen Moment der Nadel und von dem Sinus des Ablenkungswinkels. Um daher quantitative Werte für die Angaben dieses Elektrometers zu erhalten, ist es nötig, Vorversuche anzustellen, und die Gradablesungen der Winkelablenkung nach einer genauen Skala zu »calibrieren«.

282. Elektrometer mit Anziehungsscheibe. Snow Harris war der erste, welcher ein Elektrometer zur Messung der Anziehung zwischen einer elektrischen und einer unelektrischen Scheibe konstruierte; und den von ihm erfundenen Apparat kann man im allgemeinen als eine Wage zur *Abwägung* einer elektrischen Ladung bezeichnen. Genauer genommen, war es ein Apparat, welcher der Form nach einer Wage ähnlich war, die an dem einen Ende eine leichte Wagschale trug; am andern Ende hing eine Scheibe oberhalb einer festen, isolierten Scheibe, welcher die zu messende Ladung mitgeteilt wurde. Der Hauptfehler dieses Apparates rührte von der unregelmässigen Verteilung der Ladung auf der Scheibe her. Die von einem elektrischen Punkte ausgeübte Kraft nimmt ab, wie die *Quadrate* der Entfernungen zunehmen, da die Kraftlinien strahlenförmig verlaufen. Doch in dem Falle einer gleichmässig elektrisierten ebenen Oberfläche sind die Kraftlinien senkrecht zur Oberfläche und einander parallel, und die Kraft ist von dem Abstande unabhängig. Die Verteilung auf einer kleinen Kugel erfüllt nahezu die erste dieser Bedingungen. Die Verteilung auf einer dünnen Scheibe würde annähernd die letztere Bedingung erfüllen, falls nicht die Kanten der Scheibe, wo die Oberflächendichte bedeutend grösser ist, (vergl. Art. 38) einen störenden Einfluss ausübten. Aus diesem Grunde war Snow Harris' Elektrometer sehr unvollkommen.

Kelvin hat verschiedene sehr wichtige Modifikationen an dem Elektrometer mit Anziehungsscheibe vorgenommen, indem

er vor allen Dingen eine »Schutzringplatte« anbrachte und dafür sorgte, dass er mit einem bestimmten Normalpotential arbeitete. Es würde den Umfang dieser Vorlesungen überschreiten, wollten wir eine vollständige Beschreibung aller verschiedenen Formen der Elektrometer mit Anziehungsscheibe geben; die wesentlichen Prinzipien derselben können wir jedoch sogleich erklären.

Die Scheibe C, deren Anziehung gemessen werden soll, wird innerhalb einer festen Schutzringplatte B (Fig. 144) aufgehängt,

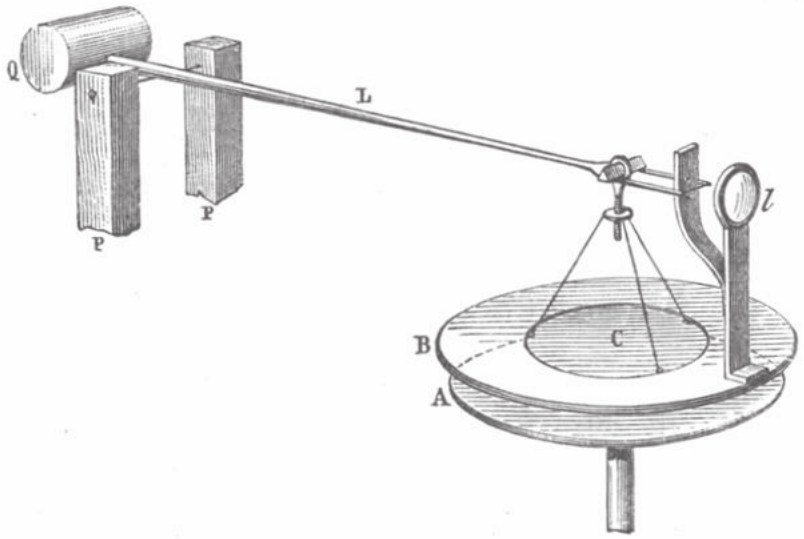


Fig. 144.

welche sie umgiebt, ohne sie zu berühren, und welche mit derselben durch einen dünnen Draht in metallischer Verbindung steht. Ein Hebel L trägt die Scheibe und ist mit einem Gegengewichte versehen. Um zu erfahren, ob die untere Fläche der Scheibe mit der untern Fläche der Schutzringplatte genau in derselben Höhe steht, ist oberhalb ein kleiner Visierstab oder Index angebracht, und mit einer Linse *l* versehen, um die Angaben desselben zu beobachten. Unterhalb der Scheibe und des Schutzringes befindet sich eine zweite Scheibe A, welche auf einer isolierenden Stütze ruht. Diese untere Scheibe lässt sich nach Belieben durch eine Mikrometerschraube heben oder senken, wobei sehr darauf zu achten ist, dass der Mechanismus es gestattet, die Scheibe stets parallel zur Ebene der Schutzringplatte zu bewegen. Da nun die Scheibe und der Schutzring mit einander in metallischer Berührung stehen, so bilden sie thatsäch-

lich eine einzige Oberfläche, und da die Unregelmässigkeiten in der Verteilung an den Kanten der Oberfläche vorhanden sind, so ist die Verteilung auf der Oberfläche der Scheibe in Wirklichkeit gleichmässig. Jeder Anziehung der untern Scheibe auf die Platte könnte das Gleichgewicht gehalten werden, entweder durch Vermehrung des Gegengewichtes oder durch Tordierung des Drahtes, welcher als Stütze dient. In der Praxis hat es sich jedoch als sehr bequem herausgestellt, dadurch Gleichgewicht herzustellen, dass man den Abstand der untern Scheibe so lange ändert, bis die elektrische Anziehung genau denjenigen Kräften (ob Torsions- oder Schwerkraft, welche auf das Gegengewicht wirkt) das Gleichgewicht hält, welche die Scheibe über das Niveau der Schutzringplatte zu heben bestrebt sind.

Auch die Theorie des Apparates ist einfach. Es sei V_1 das Potential der beweglichen Scheibe, welche eine + Ladung von der Oberflächendichte ρ habe, und V_2 sei das Potential der festen Scheibe mit einer Ladung von der Oberflächendichte $-\rho$. Die Potentialdifferenz $V_1 - V_2$ ist die Arbeit, welche verrichtet werden müsste, um eine positive Einheitsladung von V_2 auf V_1 zu bringen. Nun ist die Kraft, welche auf eine solche, zwischen den beiden Scheiben befindliche Einheit ausgeübt wird, im ganzen $4\pi\rho$, (nämlich eine Anziehung der festen Platte im Betrage von $2\pi\rho$ und eine ebenso grosse Abstossung der beweglichen Platte; vergl. Art. 273). Ist ferner D der Abstand der beiden Scheiben, so ist, da Arbeit = Kraft × Weg,

$$V_1 - V_2 = 4\pi\rho \cdot D$$

Bezeichnen wir die Oberfläche der beweglichen Scheibe mit S, so ist $S\rho$ die gesamte auf ihr befindliche Elektrizitätsmenge; daher würde sie von der festen Scheibe mit einer Kraft $F = 2\pi\rho \cdot S\rho$ angezogen werden. Hieraus folgt:

$$\rho = \sqrt{\frac{F}{2\pi S}}$$

Setzen wir diesen Wert in die obige Gleichung ein, so ergiebt sich:

$$V_1 - V_2 = D\sqrt{\frac{8\pi F}{S}}$$

Wird F in Dyn, S in Quadratzentimetern und D in Zentimetern gemessen, so ergeben sich die Potentiale in absoluten elektrostatischen Einheiten und sind, um auf Volt reduziert zu werden, mit 300 zu multiplizieren. Bleibt demnach die Kraft F während der ganzen Versuchsreihe dieselbe, so *ist die Potentialdifferenz der beiden Scheiben ihrem Abstande direkt proportional*, wenn die Scheibe sich im Gleichgewicht befindet. Die Wurzelgrösse $\sqrt{\frac{8\pi F}{S}}$ können wir ein für allemal als eine »Konstante« des Apparates ermitteln.

Bei den sorgfältiger gearbeiteten Apparaten, wie z. B. bei dem **»absoluten Elektrometer«** sind Scheibe und Schutzringplatte mit einem Metallgitter umgeben; und beide stehen mit einem Kondensator in Verbindung, um sie auf bekanntem Potential zu erhalten. Dies macht die Bestimmung des Nullpunktes überflüssig, denn dann sind die *Potentialdifferenzen den Differenzen der Mikrometerangaben proportional*, oder

$$V_1 - V_2 = (D_1 - D_2)\sqrt{\frac{8\pi F}{S}}.$$

Der Kondensator ist bei diesen Apparaten mit einer Messvorrichtung versehen, die selbst eine Anziehungs-Scheibe ist, und welche anzeigt, wann derselbe auf das richtige Potential gebracht ist; ausserdem hat der Kondensator noch eine Ladungsvorrichtung (replenisher), welcher die Ladung verstärkt oder schwächt; derselbe besteht aus einer kleinen Influenz-Maschine (vergl. Art. 50).

283. Das Quadrant-Elektrometer. W. Thomson's Quadrant-Elektrometer ist eine ganz andere Art von Elektrometern, bei dem eine elektrische Hilfsladung Verwendung findet, welche der Nadel des Apparats vorher mitgeteilt worden ist. Die Nadel, welche aus einem dünnen, platten Metallstück besteht, welches horizontal an einem Faden oder dünnen Drahte aufgehängt, und in dieser Lage mit Elektrizität, beispielsweise mit +, geladen ist, wird von einer — Ladung angezogen, von einer + dagegen abgestossen; und diese Anziehung oder Abstossung

ist um so stärker, je stärker diese Ladungen und die Ladung auf der Nadel sind. Vier Quadranten aus Messing (Fig. 145) sind horizontal unter der Nadel befestigt, ohne jedoch dieselbe oder einander zu berühren. Je 2 gegenüberstehende Quadranten sind durch feine Drähte mit einander verbunden. Sind die Quadranten 1 und 3 im Vergleich zu den Quadranten 2 und 4 schwach positiv elektrisch, so bewegt sich die Nadel von den erstern weg näher zu den letztern.

Fig. 145.

Wenn zwischen den Quadrantenpaaren die geringste Potentialdifferenz besteht, macht die Nadel, welche durch die Elastizität des Drahtes in ihrer Nullpunktslage gehalten wird, eine Drehung und zeigt auf diese Weise die Potentialdifferenz an. Sind diese Ablenkungen gering, so sind die Ablesungen an der Skala den Potentialdifferenzen nahezu proportional. Der Apparat besitzt eine solche Empfindlichkeit, dass er noch eine Potentialdifferenz zwischen den Quadranten anzeigt, welche $\frac{1}{70}$ von derjenigen des Daniell'schen Elementes beträgt. Ist V_1 die Potentialdifferenz des einen Quadrantenpaares, V_2 die des andern, und V_3 das Potential der Nadel, so ist die ablenkende Kraft der Differenz $V_1 - V_2$ und ebenso der Differenz zwischen V_3 und dem Mittelwerte von V_1 und V_2 proportional, d. h.

$$f = a\,(V_1 - V_2)\left(V_3 - \frac{V_1 + V_2}{2}\right)$$

wo a eine Konstante bedeutet, welche dem vorliegenden Apparate entspricht.

Fig. 146 zeigt eine sehr einfache Form des Quadrant-Elektrometers, wie dasselbe zu qualitativen Versuchen eingerichtet ist. Die 4 Quadranten sind von einem Glasgehäuse umgeben, und die Nadel, welche unterhalb einen leichten Spiegel M trägt, ist mittelst eines sehr feinen Metalldrahtes F an einem Torsionskreise C befestigt. Dieselbe wird bis zu einem bestimmten Potential elektrisiert, indem man sie durch einen an C befestigten Draht mit einer geladenen Leydener Flasche oder einem andern Kondensator in Verbindung bringt. Um die kleinsten

Bewegungen der Nadel beobachten zu können, sind ein Fernrohr und eine Skala so aufgestellt, dass der durch das Fernrohr schauende Beobachter in dem kleinen Spiegel ein Bild des Null-

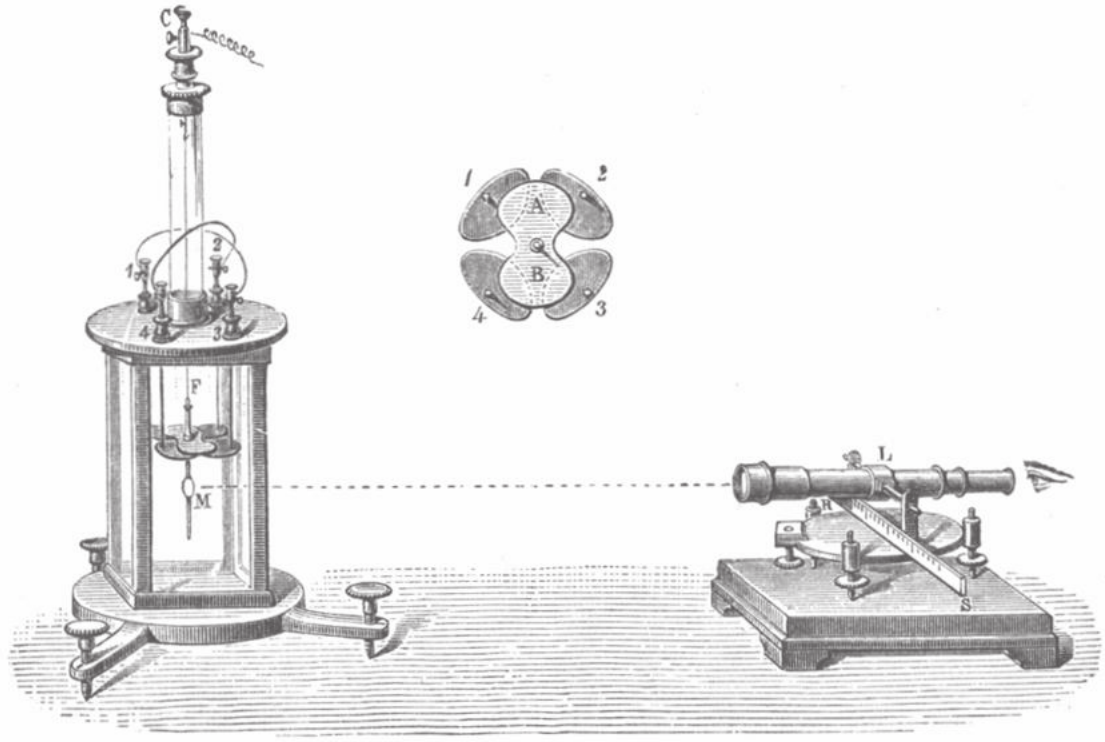


Fig. 146.

punkts der Skala erblickt. Die Drähte, welche den ersten und dritten, sowie den zweiten und vierten Quadranten verbinden, sieht man oberhalb des Glasgehäuses.

Zum Zwecke sehr genauer Messungen hat man noch verschiedene Verbesserungen an dem Apparate angebracht. Man wendet 2 Quadrantenscheiben an, eine obere und eine untere, zwischen denen sich die Nadel befindet. An Stelle des Torsionsdrahtes findet sich eine empfindliche bifilare Aufhängung. Um die Ladung der Leydener Flasche zu erhalten, wird noch ein »Ladungsapparat« hinzugefügt; und eine »Anziehungs-Scheibe« ähnlich derjenigen des absoluten Elektrometers hat den Zweck, anzugeben, wann die Flasche das richtige Potential hat. Bei diesen Formen besteht die Flasche aus einem unterhalb der Quadranten stehenden Glasgefässe, welches von aussen mit Streifen aus Zinnfolie überzogen ist, und konzentrierte Schwefel-

säure enthält, welche den doppelten Zweck hat, den Apparat durch Absorbierung der Feuchtigkeit trocken zu erhalten, und als innere Belegung der Flasche zu wirken. Es ist gebräuchlicher, von einer Lampe einen Lichtfleck auf eine Skala mit Hilfe des kleinen Spiegels fallen lassen (wie dies beim Spiegelgalvanometer beschrieben wurde) als die subjektive Methode mit dem Fernrohr zu verwenden, wobei immer nur eine Person beobachten kann. Ist der Apparat mit Ladungs- und Messvorrichtung versehen, so lassen sich die Messungen in absoluten Einheiten vornehmen, vorausgesetzt, dass man die »Konstante« des betreffenden Apparates einmal bestimmt hat (dieselbe ist von der Aufhängung der Nadel, von der Grösse und Stellung der Nadel und der Quadranten, von dem Potential der Hilfsmessvorrichtung etc. abhängig).

284. Den Gebrauch des Apparates wollen wir durch ein Beispiel klar machen. Werden die beiden Enden eines dünnen Drahtes auf zwei verschiedenen Potentialen erhalten, so fliesst bekanntlich ein Strom durch den Draht; und wird das Potential an verschiedenen Stellen des Drahtes gemessen, so ergiebt sich, dass dasselbe vollkommen gleichmässig von dem Ende mit hohem Potential bis zu dem Ende mit niedrigerem Potential abnimmt. In dem Punkte, welcher vom Ende um den vierten Teil der Länge des Drahtes entfernt ist, hat das Potential um den vierten Teil der gesamten Differenz abgenommen. Dies liesse sich dadurch beweisen, dass man die beiden Enden des Drahtes, durch welchen der Strom fliesst, mit den Enden des Quadrant-Elektrometers verbindet, wodurch dann das eine Quadrantenpaar auf dem hohen und das andere auf dem niedrigen Potential sein würde. Die Nadel würde sich drehen und eine bestimmte Ablenkung anzeigen. Hebt man jetzt die Verbindung zwischen dem einen Quadrantenpaare und dem Drahtende mit niedrigem Potential auf, und stellt statt dessen eine Verbindung zwischen dem Quadrantenpaare und einem Punkte her, welcher von demjenigen Ende des Drahtes, wo das hohe Potential ist, um $\frac{1}{4}$ der Drahtlänge entfernt ist, so zeigt die Nadel sofort an,

dass die Potentialdifferenz nur den vierten Teil von vorher beträgt.

Oft wird das Quadrant-Elektrometer einfach als ein sehr empfindliches Elektroskop benutzt, und zwar in der Weise, dass man eine elektrische Potentialdifferenz dadurch bestimmt, dass man ihr durch eine gleiche Potentialdifferenz entgegengesetzter Art das Gleichgewicht hält. Man erkennt das Gleichgewicht daran, dass die Nadel des Elektrometers dann keinen Ausschlag geben darf. Solche Methoden des Experimentierens sind als »*Null-Methoden*« bekannt.

285. Elektrostatisches Voltmeter. Wir haben gesehen, dass wir bei dem Quadrant-Elektrometer der Nadel eine hohe Anfangsladung erteilen müssen, und zwar deshalb, weil die Kraft, welche die Nadel zu drehen strebt, für eine bequeme Beobachtung zu gering sein würde, wenn nicht die Quadranten und die Nadel eine viel grössere Potentialdifferenz aufweisen würden, als die geringe Anzahl der zu messenden Volt. Wo wir es jedoch mit hohen Potentialdifferenzen zu thun haben, ist eine besonders zu ladende Nadel nicht erforderlich; wir können einfach den einen Konduktor mit der Nadel und den andern mit den Quadranten verbinden; dann ist die anziehende Kraft, welche unter sonst gleichen Umständen wächst wie das Quadrat der Potentialdifferenz, hinreichend gross, um zuverlässige Ablesungen zu gewähren. Diese Gebrauchsmethode des Instruments ist als die *idiostatische* bekannt.

Fig. 147 zeigt eine gebräuchliche Form des Apparates, wenn derselbe zur Messung von Potentialdifferenzen von 1000 Volt und darüber benutzt werden soll. Die Nadel *NN* ist ein schaufelförmiges Blatt von Aluminium, welches in seinem Mittelpunkte auf Schneiden ruht; seine Stellung wird durch die Schwere reguliert, indem an eine Verlängerung an seinem untern Ende kleine Gewichte gehängt werden. Die Quadranten *Q* befinden sich beide hinter der Nadel derart, dass, falls sie mit derselben eine Potentialdifferenz

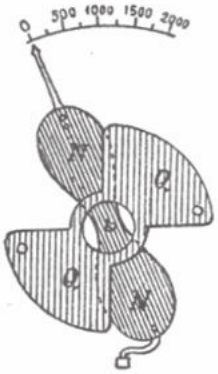


Fig. 147.

haben, die Nadel aus ihrer Normalstellung abgelenkt wird und ihr Index sich vor einer in Grade geteilten Skala bewegt.

Ob nun die Nadel + geladen ist und die Quadranten negativ, oder umgekehrt, ist ohne Belang; es wird stets eine Anziehung zwischen denselben stattfinden und wir haben demnach stets eine Ablenkung, selbst dann, wenn die Potentialdifferenz schnell wechselt. Durch diese Eigenschaft ist der Apparat sehr geeignet, bei Anwendung von Wechselströmen die Anzahl der Volt zu messen.

Ein weiterer Vorzug dieses Apparates im Vergleich zu den Galvanometern mit hohem Widerstande, welche als Voltmeter benutzt werden, besteht darin, dass derselbe keinen Strom aufnimmt und daher keine Kraft verloren geht.

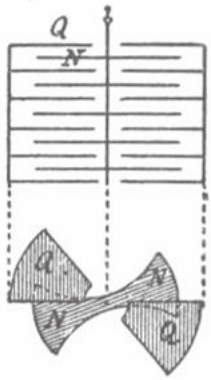


Fig. 148.

Um das elektrostatische Voltmeter so empfindlich zu machen, dass es noch bis 100 Volt misst, befestigt man auf einem vertikalen Aluminiumdrahte mehrere Nadeln horizontal über einander, welche durch eine Reihe von symmetrisch auf beiden Seiten angebrachten Quadranten angezogen werden. Ein solcher Apparat ist Kelvin's *Multicellular-Voltmeter*, dessen Querschnitt in Fig. 148 gegeben ist.

286. Elektrometer mit trockener Säule. Das Prinzip der Symmetrie, welches bei dem Quadrant-Elektrometer angewendet wird, kam schon früher bei dem Bohnenberger'schen Elektroskop — einem Apparate von bedeutend geringerer Genauigkeit — zur Anwendung. Hier wurde die zu untersuchende Ladung einem einzelnen Goldblatte mitgeteilt, welches symmetrisch zwischen den Polen einer trockenen Säule hing und dann von einem der beiden Pole angezogen wurde. Fechner änderte den Apparat dahin ab, dass er den + Pol der trockenen Säule mit einem zwischen zwei Metallplatten hängenden Goldblatte verband; dasselbe wurde dann von der am meisten + Platte abgestossen. Die Inkonstanz trockener Säulen als Quellen

der Elektrisierung veranlasste Hankel, eine Batterie von sehr vielen kleinen Daniell'schen Elementen zu benutzen.

287. Kapillar-Elektrometer. Das Kapillar-Elektrometer von Lippmann wurde in der von Dewar angegebenen Modifikation in der 20. Vorlesung beschrieben.

XXIII. VORLESUNG: *Dielektrische Kapazität etc.*

288. Eine Leydener Flasche oder ein anderer Kondensator lässt sich als ein Konduktor betrachten, bei welchem (infolge der besondern Einrichtung, dass die beiden entgegengesetzt geladenen Oberflächen einander genähert werden) der leitenden Oberfläche eine sehr grosse Ladung mitgeteilt werden kann, ohne dadurch ihr Potential sehr zu erhöhen. Die Kapazität eines Kondensators wird wie die eines einfachen Konduktors durch die elektrische Menge gemessen, welche erforderlich ist, um die Potentialeinheit zu erzeugen.

289. Theorie des sphärischen Kondensators. Wir wollen annehmen, dass eine Leydener Flasche aus 2 konzentrischen Metallkugeln besteht, von denen die eine innerhalb der andern sich befindet, und dass der Raum zwischen beiden Kugeln mit Luft gefüllt sei. Die innere Kugel A stellt die innere Belegung von Zinnfolie vor, und die äussere Kugel B (Fig. 149) stellt die äussere Belegung vor. Die Radien dieser Kugeln seien bez. r und r'. Nehmen wir an, dass der Kugel A eine Ladung von Q Einheiten mitgeteilt sei, so induziert dieselbe auf der innern Seite von B eine ebenso grosse negative Ladung — Q, und auf die äussere Seite von B wird eine Ladung + Q abgestossen. Letztere wird durch Verbindung mit der »Erde« abgeleitet und braucht nicht weiter berücksichtigt zu werden. Berechnet man das

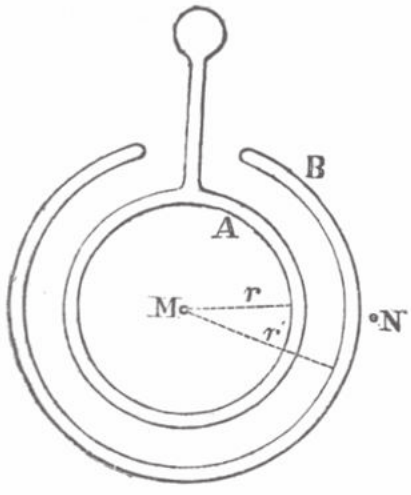


Fig. 149.

Potential [1]) im Mittelpunkte M nach der im Art. 258 angegebenen Regel, so ergiebt sich:

$$V_M = \frac{Q}{r} - \frac{Q}{r'}.$$

In einem Punkte N ausserhalb der äussern Kugel und sehr nahe an ihrer Oberfläche ist das Potential dasselbe, als wenn diese beiden Ladungen, + Q und — Q in M konzentriert wären. Folglich:

$$V_N = \frac{+ Q - Q}{r'} = 0.$$

Mithin ist die Potentialdifferenz:

$$V_M - V_N = \frac{Q}{r} - \frac{Q}{r'} = Q\frac{r' - r}{rr'}$$

und hieraus folgt: $\frac{Q}{V_M - V_N} = \frac{rr'}{r' - r}$.

Nach dem Artikel 265 ist aber die Kapazität

$$C = \frac{Q}{V_M - V_N}, \text{ folglich } C = \frac{rr'}{r' - r}.$$

Wir ersehen aus dieser Formel, dass die Kapazität des Kondensators der Grösse der Metallkugeln proportional ist, und, falls die isolierende Schicht sehr dünn ist — d. h. falls r fast ebenso gross wie r' — die Differenz $r' - r$ sehr klein und der Wert des Ausdrucks $\frac{rr'}{r' - r}$ sehr gross wird. Dies beweist den Satz, dass die Kapazität eines Kondensators von der Dicke der dielektrischen Schicht abhängt. Ist r' im Vergleich zu r sehr gross, so wird der Ausdruck für die Kapazität einfach gleich r.

290. Spezifische induktive Kapazität. Cavendish machte zuerst die Entdeckung, dass die Kapazität eines Kondensators

---

1) Der Leser muss sich errinnern, dass innerhalb eines geschlossenen Konduktors keine elektrische Kraft vorhanden ist, und dass deshalb das Potential im Mittelpunkte genau dasselbe ist, wie in einem beliebigen andern Punkte innerhalb der Kugel.

nicht bloss von seinen Dimensionen abhängt, sondern auch von der *induktiven Fähigkeit* desjenigen dielektrischen Körpers, welcher sich zwischen den beiden Oberflächen befindet. Haben 2 Kondensatoren (gleichviel von welcher der zu beschreibenden Formen) genau dieselbe Grösse, aber verschiedene dielektrische Körper, der eine z. B. Luft, der zweite irgend einen andern isolierenden Körper, so ergiebt sich, dass gleiche Elektrizitätsmengen, welche ihnen mitgeteilt werden, ungleiche Potentialdifferenzen erzeugen; oder mit andern Worten, sie haben dann nicht dieselbe Kapazität. Ist der dielektrische Körper z. B. Glimmer, so ist die Kapazität ungefähr 6mal so gross, denn Glimmer besitzt eine grosse induktive Fähigkeit und leitet die elektrostatische Influenz 6mal besser durch sich hindurch, als die Luft. Der Name **spezifische induktive Kapazität** [1]) oder **dielektrische Kapazität** wurde gewählt, um das Verhältnis der Kapazitäten zweier gleich grossen Kondensatoren zu bezeichnen, von denen der eine ein Luftkondensator, der andere mit dem betreffenden dielektrischen Körper gefüllt war. Die spezifische induktive Kapazität trockener Luft bei einer Temperatur von 0^0 C. und einem Drucke von 76 Zentimetern Quecksilber wird in Ermangelung einer bekannten Methode, ihren absoluten Wert zu bestimmen, als Einheit gesetzt. Das Zeichen k gebraucht man zur Bezeichnung der dielektrischen Kapazität eines Körpers.

Im Jahre 1775 wurde von Cavendish die dielektrische Kapazität des Glases, des Wachses und anderer Körper gemessen, indem er sich Kondensatoren herstellte, bei welchen die betreffenden Substanzen zwischen 2 kreisförmigen Metallplatten benutzt wurden, und indem er die Kapazität dieser Kondensatoren mit derjenigen eines Luftkondensators (ähnlich Fig. 40) und mit andern Kondensatoren, welche er »Versuchsplatten«

1) Der Name ist nicht ganz glücklich gewählt — spezifische Induktion würde besser gewesen sein, und ist in Bezug auf dielektrische Körper der analoge Ausdruck zu »spezifischer Leitung« der Konduktoren. Der Ausdruck dielektrische Kapazität wird ebenfalls von einigen neuern Schriftstellern gebraucht.

nannte, verglich. Er versuchte sogar, die Kapazitäten dieser Versuchsplatten mit derjenigen einer Kugel von 32 cm Durchmesser zu vergleichen, welche er in der Mitte eines Zimmers aufgehängt hatte.

291. Faraday's Versuche. Im Jahre 1837 entdeckte Faraday, unabhängig von Cavendish, dessen bis dahin noch nicht veröffentlichte Untersuchungen ihm unbekannt waren, die spezifische induktive Kapazität und bestimmte ihren Wert für verschiedene Körper, indem er zu diesem Zwecke zwei Kondensatoren von der in Fig. 150 veranschaulichten Gestalt benutzte. Jeder derselben bestand aus einer Messingkugel A, welche rings von einer hohlen Messingkugel B umgeben, und durch einen langen Schellackstab von ihr isoliert war, durch welche ein in eine Kugel *a* endigender Draht führte. Die äussere Kugel bestand aus zwei Teilen, welche von einander getrennt werden konnten, um den hohlen Raum mit irgend einem gewünschten Material zu füllen: der Versuch bestand dann darin, ihre Kapazitäten zu vergleichen, wenn die eine Kugel mit dem zu untersuchenden Körper, die andere nur mit trockener Luft gefüllt war. Einer der Kondensatoren wurde mit Elektrizität geladen. Es wurden nun die beiden innern Belegungen der beiden Kondensatoren mit einander in metallische Berührung gesetzt und ebenso die äussern Belegungen mit einander verbunden und dadurch bewirkt, dass die mitgeteilte Ladung sich jetzt auf beide Kondensatoren verteilte. Wären ihre Kapazitäten nun gleich, so würden sie die Ladung gleichmässig unter sich verteilen, und das Potential würde nach der Berührung gerade halb so gross sein, wie es in dem geladenen Kondensator vor der Berührung gewesen war. Wäre die Kapazität des einen grösser,

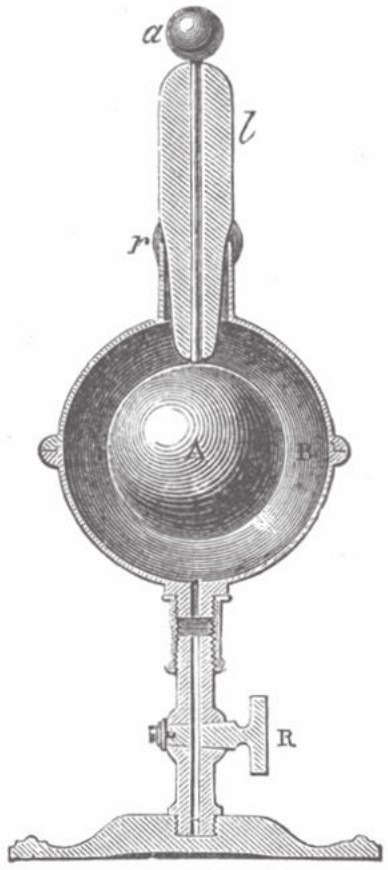


Fig. 150.

als die des andern, so würde das resultierende Potential nicht genau die Hälfte des Anfangspotentials betragen, weil sie die Ladung nicht gleichmässig unter sich verteilen würden, sondern im Verhältnis zu ihren Kapazitäten. Die Potentiale der Ladungen wurden vor und nach der Berührung mittelst einer Torsionswage gemessen [1]). Faradays Resultate waren folgende: Schwefel 2,26; Schellack 2,0; Glas 1,76 oder mehr.

292. Neuere Untersuchungen. Seit 1870 haben sich unsere Kenntnisse über diesen Gegenstand bedeutend vervollkommnet. Gibson und Barclay bestimmten die induktive Kapazität des Paraffin, indem sie die Kapazität eines Luftkondensators mit einem solchen von Paraffin mit Hilfe eines Schlittenkondensators verglichen, wobei sie ein empfindliches Quadrantelektrometer benutzten, um die Kapazität der Kondensatoren genau gleich zu machen. Hopkinson hat die dielektrische Kraft der verschiedenen Glassorten untersucht, indem er eine konstante Batterie benutzte, um die erforderlichen Potentialdifferenzen zu erzeugen, sowie einen mit einem Schutzringe versehenen Kondensator. Dieser Schutzring hatte einen ähnlichen Zweck wie derjenige der absoluten Elektrometer. Gordon hat zahlreiche Beobachtungen angestellt, wobei er einen empfindlichen Apparat verwendete, welcher unter dem Namen einer statischen »Induktionswage« bekannt ist und aus einem zusammengesetzten Kondensator besteht, der in Verbindung mit einem Quadrantelektrometer so eingerichtet ist, dass, wenn die Kapazitäten der einzelnen Teile gleich gemacht werden, keine Ablenkung in dem Elektrometer stattfindet, gleichviel wie stark oder welcher Art

---

1) Der Wert der dielektrischen Kapazität k liess sich dann auf folgende Weise berechnen:

$$Q = VC = V'C + V'Ck$$

(wo C die Kapazität des ersten Apparates und V sein Potential bedeutet; V′ aber das Potential nach der Verbindung mit dem zweiten Apparate, dessen Kapazität $= Ck$); folglich

$$V = V'(1 + k) \text{ und } k = \frac{V - V'}{V'}.$$

die im Augenblicke angewendete Elektrisierung ist. Wird dieser Apparat in Verbindung mit einer Induktionsrolle (Fig. 128) und einem schnellen Kommutator angewendet, so kann man mit demselben die induktive Kapazität messen, selbst wenn die Dauer der Ladung nur ganz kurz ist, indem die Elektrisierung 12000 mal pro Sekunde umgekehrt wird. Solcher Apparat überwindet daher eine grosse Schwierigkeit, der man bei diesen Messungen begegnet, nämlich die Schwierigkeit, welche aus der offenbaren Absorption eines Teiles der Ladung durch den dielektrischen Körper entsteht; die Kapazität des Körpers ist bei langsamer Messung verschieden von seiner »momentanen wahren Kapazität«. Von dieser elektrischen Absorption ist ausführlicher in Art. 294 die Rede. Aus diesem Grunde weichen die Werte, die verschiedene Beobachter für die dielektrische Kapazität der einzelnen Körper gefunden haben, bedeutend von einander ab, besonders wo es sich um weniger vollkommene Isolatoren handelt. Die folgende Tabelle enthält eine Uebersicht der Beobachtungen Gordon's:

Luft	1,00
Glas	3,013 bis 3,258
Ebonit	2,284
Guttapercha	2,462
Kautschuck	2,220 bis 2,497
Paraffin (fest) . . .	1,9936
Schellack	2,74
Schwefel	2,58.

Hopkinson, dessen Methode eine »langsame« war, fand für Glas viel höhere induktive Kapazitäten, welche zwischen den Werten 6,5 und 10,1 lagen, und zwar hatten die dichtern Sorten höhere Kapazitäten. Dem Glimmer entsprechen Werte zwischen 5,5 und 8. Cavendish machte die Beobachtung, dass die scheinbare Kapazität des Glases bedeutend grösser bei denjenigen Temperaturen wurde, bei denen dasselbe anfängt, die Elektrizität zu leiten. Boltzmann veröffentlichte seine Untersuchungen über den Fall zweier krystallinischer Körper, des Isländischen Spats

und des Schwefels, deren induktive Kapazität in verschiedenen Richtungen eine andere ist, entsprechend ihrer Lage zu den Axen des Krystalls.

293. Dielektrische Kapazität von Flüssigkeiten und Gasen. Auch die dielektrische Kapazität von Flüssigkeiten hat spezifische Werte, z. B.:

Terpentin	2,16
Petroleum	2,03 bis 2,07
Schwefelkohlenstoff .	1,81.

Faraday untersuchte mit Hilfe seines Appapates (Fig. 150) die induktive Kapazität verschiedener Gase. Er füllte den einen Kondensator mit Luft, den andern mit dem zu untersuchenden Gase, welches er durch die Röhre unterhalb der Kugel einströmen liess, nachdem er letztere mit einer Luftpumpe luftleer gemacht hatte. Die Methode war jedoch zu ungenau, als dass er einen Unterschied zwischen ihnen hätte entdecken können. In der neuern Zeit haben Boltzmann, und unabhängig von ihm, Ayrton und Perry, die dielektrischen Kapazitäten verschiedener Gase nach sehr genauen Methoden bestimmt, und ihre Resultate stimmen sehr hübsch überein.

	Boltzmann.	Ayrton und Perry.
Luft	1	1
Luftleerer Raum	0,999410	0,9985
Wasserstoff	0,999674	0,9998
Kohlensäure	1,000356	1,0008
Kohlenwasserstoffgas	1,000722	
Schweflige Säure		1,0037

Wenn man an Stelle der Luft ein Medium von grösserer dielektrischen Kraft k benutzt, so ändern sich die Kräfte, welche die geladenen Körper auf einander ausüben. Bei gegebenen festen Ladungen sind die Kräfte der Grösse k *umgekehrt* proportional, während bei gegebenen Potentialdifferenzen der Körper die Kräfte der Grösse k direkt proportional sind.

294. Mechanische Wirkungen der dielektrischen Spannung. Der Umstand, dass verschiedene isolierende Körper spezifische induktive Fähigkeit haben, ist eine ausreichende Widerlegung der Ansicht, dass die Influenz nichts weiter als eine »Wirkung in die Ferne« sei, denn es ist klar, dass das dielektrische Medium selbst bei der Verbreitung der Influenz in Betracht kommt, und dass einige Media besser als andere die Influenz durch sich hindurch wirken lassen. Das Vorhandensein eines Residuums (Art. 61) lässt sich entweder durch die Annahme erklären, dass der dielektrische Körper aus heterogenen Teilchen besteht, welche ungleiche Leitungsfähigkeit haben, wie Maxwell angenommen hat, oder durch die Hypothese, dass die Moleküle wirklich einer Spannung unterworfen werden, von welcher sie sich nicht sogleich wieder erholen, besonders wenn die Spannung längere Zeit vorhielt. Kohlrausch und andere haben auf die Analogie zwischen dieser Erscheinung und derjenigen der »elastischen Nachwirkung« fester Körper hingewiesen, welche einer biegenden oder tordierenden Kraft unterworfen worden waren. Ein Glasfaden z. B., der durch eine gewisse Kraft tordiert wird, kehrt, sich selbst überlassen, fast in seine ursprüngliche Lage wieder zurück, eine geringe dauernde Verschiebung bleibt zurück, von welcher er sich jedoch langsam erholt, wobei das Verhältnis der Rückkehr in die frühere Lage von der Grösse und Dauer der ursprünglichen tordierenden Kraft abhängt. Ein Quartzfaden zeigt nie eine dauernde Verschiebung. Hopkinson hat gezeigt, dass sich mehrere Residua über einander ansammeln lassen, und sogar Ladungen entgegengesetzter Art, welche allmählich »entweichen«, wenn der gespannte Körper allmählich in seine ursprüngliche Lage zurückkehrt. Perry und Ayrton haben auch diesen Gegenstand untersucht und gezeigt, dass bei den Polarisationsladungen der Voltameter eine ähnliche Nachwirkung eintritt [1]). Luftkondensatoren

1) Es scheint hiernach, dass Maxwell's Annahme der heterogenen Struktur, infolge welcher eine residuale Elektrisierung an der Grenzschicht der Teilchen stattfindet, deren elektrische Leitungsfähigkeit verschieden ist, die

zeigen keine Residua, ebenso wenig wie Quartzplatten, welche aus homogenen Krystallen geschnitten sind.

Wird ein Kondensator entladen, so vernimmt man oft einen Ton. Dies bemerkte Kelvin bei Luftkondensatoren; Varlay und Dolbear konstruierten Telephone, bei welchen durch die schnelle Ladung und Entladung eines Kondensators musikalische wie artikulierte Töne erzeugt wurden.

Was die Natur der molekularen oder mechanischen Vorgänge in dem dielektrischen Körper anbetrifft, wenn derselbe auf diese Weise der Spannung der elektrostatischen Induktion ausgesetzt wird, so ist hierüber nichts bekannt. Ein wichtiger Versuch Faraday's ist von grosser Bedeutung, da derselbe zeigt, dass die Induktion eine, wie er sich ausdrückte, »Wirkung benachbarter Atome« ist. Ein gläserner Trog (Fig. 151) wird z. T. mit Terpentinöl angefüllt, welchem einige in kleine Stücke geschnittene Fäden von trokkener Seide zugesetzt werden. In die Flüssigkeit führen zwei Drähte, deren einer mit der Erde in Verbindung steht, während man den andern mit dem Kollektor einer Elektrisiermaschine verbindet. Die Seidenstückchen kommen von allen Seiten der Flüssigkeit und bilden eine von Draht zu Draht führende Kette, ein Bild der elektrischen Kraftlinien. Sie fahren auf einmal auseinander, wenn die Zufuhr der Elektrizität aufhört. Faraday betrachtete dies als ein typisches Bild der innern Wirkungen, welche im Falle der Influenz in einem dielektrischen Körper stattfinden, dessen Teilchen, wie er annahm, »polarisiert« würden, d. h. in bestimmte Lagen gelangten, und von denen jedes ein + und ein — Ende hätte. Der Leser wird daher eine offenbare Analogie

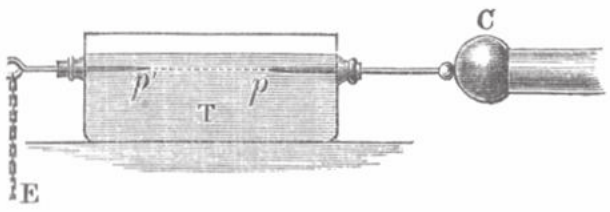


Fig. 151.

wahre Erklärung des Residuums ist. Die Erscheinung der elastischen Nachwirkung ist vielleicht selbst eine Folge der heterogenen Struktur. Glas selbst ist eine Zusammensetzung verschiedener Silikate.

zwischen dem Zustande der Teilchen eines dielektrischen Körpers finden, an welchem eine Influenz stattfindet, und den Molekülen eines Stück Eisens oder Stahls, welches der magnetischen Induktion unterworfen wird. Anstatt Seide kann man auch schwefelsaures Chinin verwenden oder man kann fein zerteiltes Schwefelantimon auf den Boden einer Glasschüssel streuen und eine Petroleumschicht darüber legen, um die elektrischen Kraftlinien zu zeigen.

Siemens hat gezeigt, dass das Glas einer Leydener Flasche merklich erwärmt wird, wenn dieselbe zu wiederholten malen und schnell hinter einander geladen und entladen wird. Hieraus folgt offenbar, dass die Aenderungen der dielektrischen Spannung von einer molekularen Bewegung begleitet sind.

295. Elektrische Expansion. Fontana machte die Beobachtung, dass das innere Volumen einer Leydener Flasche sich vergrösserte, wenn dieselbe geladen wurde. Priestley und Volta suchten dies durch die Annahme zu erklären, dass die Anziehung zwischen den beiden geladenen Oberflächen das Glas zusammendrückte, so dass dadurch eine seitliche Ausdehnung veranlasst würde. Duter zeigte, dass die Grösse der scheinbaren Expansion der Dicke des Glases umgekehrt proportional ist und sich wie das Quadrat der Potentialdifferenz ändert. Quincke hat neuerdings gezeigt, dass, während Glas und einige andere Isolatoren elektrische Expansion zeigen, Harze und ölige Körper unter dem Einflusse der elektrostatischen Spannung eine deutliche Zusammenziehung zeigen. Mit diesen Eigenschaften bringt er die Erzeugung optischer Spannung und der von Kerr entdeckten doppelten Refraktion in Verbindung. (Vergl. die Vorlesung über Elektro-Optik).

296. Unterseeische Kabel als Kondensatoren. Ein unterseeischer Telegraphen-Kabel kann als Kondensator wirken, indem der Ozean die äussere Belegung, der innere Draht die innere Belegung bildet, während die isolierenden Schichten von Guttapercha den dielektrischen Körper bilden. Wenn das eine Ende eines untergetauchten Kabels z. B. mit dem + Pole einer

kräftigen Batterie verbunden wird, so strömt + Elektrizität in dasselbe. Bevor man am andern Ende ein Signal erhalten kann, muss eine genügende Menge Elektrizität einströmen, um das Kabel bis zu einem beträchtlichen Potential zu laden, eine Operation, welche im Falle langer Kabel mehrere Sekunden erfordern kann. Faraday sagte voraus, dass diese Verzögerung stattfinden würde. Thatsächlich ist dies für schnelles Telegraphieren durch die Atlantischen Kabel und andere ein ernstliches Hindernis. Professor Fleeming Zenkin gab folgenden experimentellen Beweis dieses Umstandes. Man rolle eine Meile des isolierten Kabel-Drahtes in einer Tonne mit Wasser zusammen (Fig. 152), indem

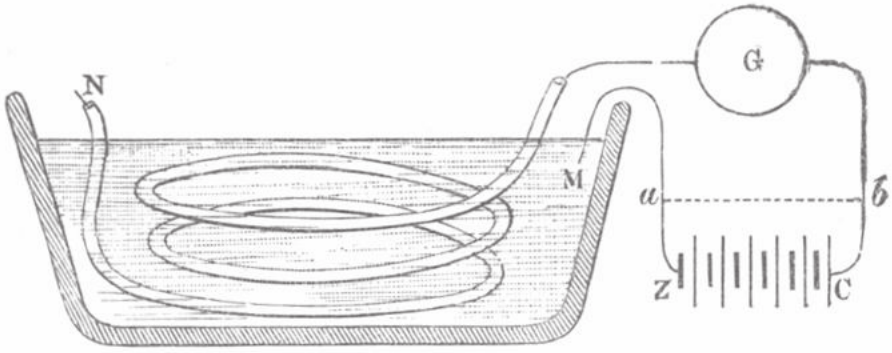


Fig. 152.

man das eine Ende N isoliert. Das andere Ende wird durch ein Galvanometer G mit grossem Widerstande mit dem + Pole einer grossen Batterie verbunden, deren — Pol durch einen Draht mit dem Wasser in der Tonne in Verbindung gebracht wird. Sowie dies geschieht, zeigt die Nadel des Galvanometers eine kräftige Ablenkung, indem + Elektrizität durch dasselbe in das Innere des Kabels strömt, und eine — Ladung sich an der Aussenseite des letztern ansammelt, dort wo das Wasser das Guttapercha berührt. Das Einströmen der Elektrizität dauert vielleicht, obgleich in abnehmendem Verhältnis, eine Stunde, bevor das Kabel vollständig geladen ist. Jetzt entfernt man die Batterie, und verbindet dafür *a* und *b* durch einen Draht; die Ladung in dem Kabel strömt dann durch das Galvanometer, welches eine entgegengesetzte Ablenkung anzeigt, und das Residuum entladet sich noch lange Zeit hindurch.

297. Anwendung der Kondensatoren. Um diese Ver-

zögerung zu vermeiden und um die Geschwindigkeit des Telegraphierens durch Kabel [1]) zu vergrössern, hat man verschiedene Methoden in Anwendung gebracht. Man verwendet sehr empfindliche Annahme-Instrumente, welche bloss einen schwachen Strom erfordern; denn bei den schwächern Batterieen ist die wirkliche, dem Kabel mitgeteilte Ladung geringer. In vielen Fällen verwendet man einen Schlüssel, welcher unmittelbar nach jedem Signal eine Ladung von entgegengesetztem Zeichen in das Kabel sendet, um die zurückgebliebene Ladung gewissermassen auszutreiben. Oft wird ein Kondensator mit einer Kapazität von einigen Mikrofarad in den Stromkreis an beiden Enden des Kabels eingeschaltet, um das Signal *einzuschränken* oder um es kürzer und schärfer zu machen, und um die Entladung durch seine Reaktion zu unterstützen. Beim Doppel-Telegraphieren (Vorl. 50) ist der Widerstand und die elektrostatische Kapazität des Kabels dadurch zu überwinden, dass man ihnen durch ein »künstliches Kabel« das Gegengewicht hält, welches aus einem Drahte von gleichem Widerstande und einem Kondensator von gleicher Kapazität besteht. Die Herren Muirhead konstruierten zur Verdoppelung des Atlantischen Kabels einen Kondensator, welcher 100,000 Quadratfuss Zinnfolie enthielt. Solche Kondensatoren wendet man auch gelegentlich bei Telegraphenlinien mit einfachem Betriebe an, um die Erdströme zu vermeiden. Sie werden in der Weise angefertigt, dass man Platten von Zinfolie zwischen solche von Glimmer oder paraffiniertem Papier stellt und die auf einander folgenden Folieplatten verbindet. Kleine Kondensatoren ähnlicher Konstruktion gebraucht man in Verbindung mit Induktionsrollen (Art. 224).

298. Praktische Einheit der Kapazität. Die Elektriker nehmen eine *Einheit der Kapazität* an, welche sie ein **Farad** nennen, und die sich auf das System der elektromagnetischen Einheiten gründet. Ein Kondensator von einem Farad Kapazität würde durch eine Ladung eines elektrischen Coulomb auf ein Potential

1) Die Kapazität des »direkten« Atlantischen Kabels von Ballinskelligs (Irland) nach Nova Scotia beträgt 992 Microfarad.

von einem Volt gebracht werden[1]). In der Praxis würde die Konstruktion eines solchen Kondensators zu grosse Schwierigkeiten haben. Die Erde selbst hat als isolierte Kugel eine Kapazität von nur $\frac{7}{10,000}$ Farad. Daher hat man als *praktische Einheit* der Kapazität das **Mikrofarad** gewählt, welches der millionste Teil eines Farad ist; eine Kapazität, welche ungefähr derjenigen eines Atlantischen Kabels von 3 Meilen Länge entspricht. Man hat Mikrofarad-Kondensatoren angefertigt, welche mehr als 22000 Quadrat-Zentimeter Zinnfolie enthalten. Ihre gebräuchliche Form zeigt Fig. 153, welche einen $\frac{1}{3}$ Mikrofarad-Kondensator darstellt. Die beiden Messingstücke auf dem Ebonitdeckel werden bezüglich mit den beiden Reihen der abwechselnden Zinnfolieplatten verbunden. Der Zapfen zwischen denselben hat den Zweck, den Kondensator im nicht geladenen Zustande zu erhalten, so lange derselbe nicht im Gebrauch ist.

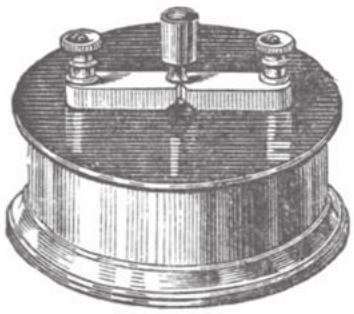


Fig. 153.

In Vorl. 32 sind Methoden angegeben, wie man die Kapazität eines Kondensators messen kann.

299. Formeln für Kapazitäten von Konduktoren und Kondensatoren. Die folgenden Formeln geben die Kapazität von Kondensatoren aller gewöhnlichen Formen, in elektrostatischen Einheiten:

Kugel: (Radius $= r$. Vergl. Art. 266)

$$C = r.$$

Zwei konzentrische Kugeln: (Radien r und r': dielektrische Kapazität $= k$).

$$C = k \frac{rr'}{r' - r}$$

Cylinder: (Länge $= l$, Radius $= r$)

$$C = \frac{l}{2 \log \text{nat} \cdot \frac{l}{r}}$$

1) Vergl. die Anmerkung über Elektromagnetische Einheiten.

Zwei konzentrische Cylinder: (Länge $= l$, dielektrische Kapazität $= k$, innerer Radius $= r$, äusserer Radius $= r'$)

$$C = k \frac{l}{2 \log \text{nat} \cdot \frac{r'}{r}}$$

Kreisförmige Scheibe: (Radius $= r$; die Dicke verschwindend)

$$C = \frac{2r}{\pi}$$

Zwei kreisförmige Scheiben: (wie beim Luftkondensator, Art. 56; Radien $= r$, Oberfläche $= S$, Dicke des dielektrischen Körpers $= b$, dielektrische Kapazität $= k$)

$$C = k \frac{r^2}{4b}$$

$$\text{oder } C = k \frac{S}{4\pi b}$$

Die letztere Formel passt für 2 beliebige parallele Scheiben, deren Oberfläche $= S$, gleichviel ob sie kreisförmig sind oder nicht, vorausgesetzt, dass sie im Vergleich zu ihrem Abstande b sehr gross sind. Um die Werte der obigen Formeln auf Mikrofarad zu reduzieren, haben wir durch 900,000 zu dividieren.

300. Energie der Entladung einer Leydener Flasche oder eines Kondensators. Aus der im Art. 258 angegebenen Definition des Potentials folgt, dass eine Arbeit von V Erg verrichtet wird, wenn man eine + elektrische Einheit auf das Potential V bringt. Dies setzt jedoch voraus, dass das Gesamtpotential V dadurch nicht erhöht wird; unter dieser Voraussetzung würde die verrichtete Arbeit QV betragen, wenn Q Einheiten auf das Potential V gebracht würden [1]). Ist jedoch das Potential von anfang an $= 0$, und wird dasselbe durch die Ladung Q auf den Wert V gebracht, so ist das Durchschnittspotential während des Versuchs nur $\frac{1}{2}$ V; folglich ist die ge-

1) Ist Q in Coulomb und V in Volt gegeben, so wird die Arbeit nicht in Erg, sondern in Joule ausgedrückt.

samte Arbeit, welche verrichtet wird, wenn die Ladung Q vom Potential o auf das Potential V gebracht wird, $= \frac{1}{2}$ QV *Erg.* Nach dem Prinzipe von der Erhaltung der Energie ist nun die Arbeit, welche verrichtet wird, wenn man eine Flasche oder einen Kondensator mit Elektrizität ladet, gleich derjenigen Arbeit, welche von jener elektrischen Menge beim Entladen der Flasche verrichtet werden könnte. Daher repräsentiert der Ausdruck $\frac{1}{2}$ QV auch die Energie der Entladung.

Da $Q = VC$, so folgt, dass wir $\frac{1}{2}$ QV in der Form $\frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$ schreiben können; d. h. wenn ein Kondensator von der Kapazität C durch eine ihm mitgeteilte Elektrizitätsmenge Q geladen wird, so ist die Energie der Ladung dem Quadrate der Menge direkt, und der Kapazität des Kondensators umgekehrt proportional.

301. Symbolische Bezeichnung eines Kondensators. Die Elektriker gebrauchen als Symbole für Kondensatoren die in Fig. 154 abgebildeten Diagramme. In der rechts befindlichen Zeichnung z. B. haben wir 6 Schichten von Zinnfolie, von denen die erste, dritte und fünfte unter sich verbunden sind, sowie die zweite, vierte und sechste.

Fig. 154.

302. Kapazitäten von parallel geschalteten Kondensatoren. Um zwei Kondensatoren parallel zu schalten, muss man die + Folien des einen mit den + Folien des andern verbinden und ebenso ihre — Folien. In Fig. 155 sind die beiden Kondensatoren K_1 und K_2 parallel geschaltet. Auf diese Weise wirken dieselben wie ein einziger grosser Kondensator von der Kapazität $K_1 + K_2$. Eine Ladung, welche an der + Seite einströmt, verteilt sich auf denselben gemäss ihren Kapazitäten.

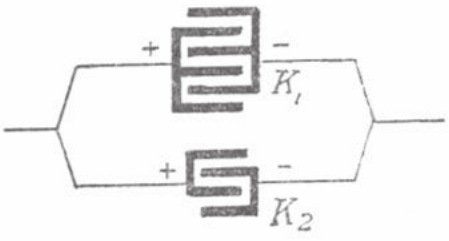


Fig. 155.

Wenn zwei gleich grosse Leydener Flaschen auf dasselbe

Potential geladen, und dann ihre innern und äussern Belegungen bezüglich mit einander verbunden werden, so ist ihre vereinigte Ladung gleich der einer Flasche von derselben Dicke und doppelt so grosser Oberfläche.

Wird auf ähnliche Weise eine geladene Leydener Flasche mit einer nicht geladenen Flasche von gleicher Kapazität in Verbindung gesetzt, so verteilt sich die Ladung gleichmässig auf beide Flaschen, und der Uebergang der Elektrizität von der einen zur andern wird dadurch bewiesen, dass man einen Funken erhält, wenn die resp. Belegungen mit einander verbunden werden. Hier geht jedoch die Hälfte der Energie der Ladung bei der Verteilung derselben verloren, denn jede Flasche hat nur noch die Ladung $\frac{1}{2}$ Q und das Potential $\frac{1}{2}$ V; daher ist die Energie der Ladung jeder Flasche das halbe Produkt aus Ladung und Potential und also nur $\frac{1}{4}$ der ursprünglichen Energie. Der bei der Verteilung der Ladung überspringende Funke ist in der That ein Beweis für den Verlust an Energie; derselbe ist ungefähr halb so kräftig wie in dem Falle, wo die erste Flasche einfach entladen worden wäre, und er ist ungefähr doppelt so kräftig, wie diejenigen kleinen Funken, welche man schliesslich bei der Entladung jeder einzelnen Flasche erhält, nachdem die Ladung sich auf beide verteilt hat.

Die Energie einer Ladung der Flasche zeigt sich, wie oben festgestellt wurde, in Gestalt eines Funkens bei der Entladung; der Schall, das Licht und die Wärme, welche erzeugt werden, sind die Aequivalente der angesammelten Energie. Geht die Entladung langsam durch einen langen, dünnen Draht von grossem Widerstande vor sich, so ist der Funke schwach, wogegen der Draht beträchtlich erwärmt wird. Eine feuchte Schnur veranlasst als mässiger Konduktor eine langsame, fast ohne Knall vor sich gehende Entladung; hier hat die elektrolytische Leitung der Feuchtigkeit wahrscheinlich eine Wirkung im Gefolge, welche derjenigen der Sekundärbatterieen (Vorl. 48) gleichkommt, indem sie die Dauer der Entladung zu verlängern strebt.

303. Kapazitäten der in Serien geschalteten Konden-

satoren. Wenn zwei Kondensatoren in Serien geschaltet werden, so wirken sie wie ein Kondensator, der eine geringere Kapazität besitzt als jeder von ihnen einzeln. *Ihre vereinigte Kapazität ist bei der Anordnung in Serien gleich dem reciproken Werte der Summe der reciproken Werte ihrer einzelnen Kapazitäten.*

Beweis. Die beiden Kondensatoren K_1 und K_2 (Fig. 156) seien in Serien geschaltet zwischen zwei Punkten mit der Potentialdifferenz V. Diese letztere verteilt sich auf dieselben im umgekehrten Verhältnis ihrer Kapazitäten, in der Weise, dass die elektrischen Mengen, welche ihre bez. Belegungen empfangen resp. abgeben, notwendigerweise gleich sind. Ist Q diese Menge, und K_3 die wirkliche Kapazität der verbundenen Kondensatoren, so ist:

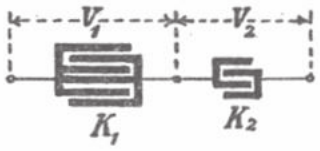


Fig. 156.

$$(1)\ .\ .\ Q = V_1K_1 = V_2K_2 = VK_3, \text{ und}$$

$$(2)\ .\ .\ V = V_1 + V_2.$$

Aus (1) folgt:

$$V_1 = \frac{VK_3}{K_1} \text{ und } V_2 = \frac{V.K_3}{K_2}$$

und daraus ergiebt sich nach Division durch VK_3:

$$\frac{1}{K_3} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}.$$

304. Ladung von Flaschen, welche in Kaskaden angeordnet sind. Franklin kam auf den Gedanken, eine Reihe von Flaschen derart anzuordnen, dass die äussere Belegung der einen mit der innern der nächsten in Verbindung stand, während die äussere Belegung der letzten Flasche mit der Erde verbunden wurde. Der Zweck dieser Anordnung war, die zweite Flasche mit der Elektrizität zu laden, welche von der äussern Belegung der ersten abgestossen wird, die dritte Flasche mit der von der zweiten abgestossenen u. s. w. Diese Anordnung in »Kaskaden« ist jedoch von keinem Vorteil, da die in der ganzen Reihe angesammelte Ladung nur so gross ist, wie die einer einzigen Flasche. Denn wird die innere Belegung der ersten Flasche auf das Potential V gebracht, so ist, da die

äussere Belegung der letzten Flasche mit der Erde in Verbindung steht und also das Potential o hat, die Potentaldifferenz zwischen der äussern und innern Belegung einer jeden Flasche nur $\frac{1}{n}$ V, wo n die Anzahl der Flaschen bedeutet. Und da die Ladung in jeder Flasche gleich ist ihrer Kapazität K, multipliziert mit ihrem Potential, so ist die Ladung in jeder Flasche bloss $\frac{1}{n}$ KV, und in allen n Flaschen die Gesamtladung $n \cdot \frac{1}{n}$ KV = KV, oder gleich der Ladung einer Flasche von der Kapazität K, erhoben auf das nämliche Potential V.

XXIV. VORLESUNG: *Erscheinungen der Entladung.*

305. Entladung durch Leitung. Ein elektrisierter Konduktor kann auf mindestens drei verschiedene Arten entladen werden, welche von dem Medium, durch welches die Entladung stattfindet, abhängen und sich nach den die Entladung begleitenden Umständen richten. Wenn die Entladung durch einen kontinuierlichen *Strom* stattfindet, wie z. B. in dem Falle, wo die Elektrizität durch einen dünnen Draht von dem Kollektor einer Maschine nach dem Reibzeuge zurückfliesst, oder von dem + Pole einer Batterie nach dem — Pole, so nennt man diesen Vorgang eine **„Entladung durch Leitung“**. Unter gewissen Umständen ist eine solche Entladung wie eine hin- und hergehende Schwingung (vergl. Vorl. 54).

306. Funken-Entladung. Wir haben gesehen, dass Induktion durch ein nicht leitendes Medium stets von einer mechanischen Spannung des Mediums begleitet ist, wobei die Spannung längs der elektrischen Kraftlinien dem Quadrate der Intensität des elektrischen Feldes proportional ist. Wenn diese Spannung sehr gross ist, so giebt das nicht leitende Medium plötzlich nach und ein *Funke* geht durch dasselbe hindurch. Eine derartige Entladung heisst eine **„Funken“-Entladung.**

Ein sehr einfacher Versuch macht die Sache bei sorgfältiger Betrachtung klar. Angenommen, wir hätten eine mit + Elektrizität geladene Metallkugel mittelst einer seidenen Schnur über einer auf dem Boden befindlichen Metallplatte aufgehängt. Lassen wir die aufgehängte Kugel nach unten herab, so springt von derselben ein Funke nach der Platte über, wenn beide einander sehr nahe gekommen sind, und die Kugel hat alsdann, wie sich herausstellt, ihre ganze vorige Ladung verloren. Dieselbe war mit einer gewissen Elektrizitätsmenge geladen, und hatte, falls sie sich ausserhalb des Bereichs anderer Konduktoren befand, eine bestimmte Kapazität (numerisch gleich ihrem in Zentimetern ausgedrückten Radius); folglich hatte sie ein bestimmtes Potential $\left(\text{nämlich } \frac{Q}{K}\right)$ und die Ladung war in einer bestimmten Oberflächendichte über sie verteilt. Die auf der Erde befindliche Platte hatte während der ganzen Zeit das Potential o. Wird jedoch die aufgehängte Kugel hinabgelassen, so ändert sich der bisherige Zustand. In der Nähe der + Ladung der Kugel würde das Potential[1]) der Platte steigen, wenn nicht durch die Wirkung der Induktion eine gerade hinreichende Menge negativer Elektrizität auf der Platte erschiene, welche ihr Potential gleich dem der Erde erhält. Die Spannung in dem elektrischen Felde zieht die + Ladung der Kugel nach unten und ändert die elektrische Verteilung auf derselben, so dass die Oberflächendichte auf der untern Seite grösser, auf der obern geringer wird. Die Kapazität der Kugel wird erhöht und ihr Potential nimmt infolge dessen entsprechend ab. Die Luftschicht zwischen der Kugel und der Platte wirkt wie das Glas einer Leydener Flasche. Je tiefer die Kugel herabgelassen wird, desto stärker häufen sich die entgegengesetzten Elektrizitäten auf beiden Seiten der Luftschicht an und desto grösser wird die Spannung

1) Der Leser muss sich erinnern, dass nach der Definition in Art. 258, das Potential in einem Punkte die Summe aller einzelnen Elektrizitätsmengen in der Nachbarschaft dieses Punktes ist, jede Menge durch ihren Abstand von dem Punkte dividiert.

der Schicht, bis die Grenze der dielektrischen Stärke erreicht ist; die Luft giebt plötzlich nach und der Funke bricht sich einen Weg hindurch.

307. Konvektive Entladung. Es giebt noch eine dritte Art der Entladung, welche sich von den beiden bereits erwähnten unterscheidet, und besonders dann eintritt, wenn Elektrizität von hohem Potential sich an einem mit einer Spitze versehenen Konduktor entladet, indem sie sich dort in so grosser Dichte anhäuft, dass sie die benachbarten Luftmoleküle elektrisiert; diese Moleküle werden dann abgestossen und führen einen Teil der Ladung mit sich fort. Solche *konvektiven Entladungen* finden sowohl in Gasen als auch in Flüssigkeiten statt, lassen sich jedoch am besten in der Luft und andern Gasen bei geringem Drucke beobachten, wie z. B. in Röhren, welche man durch eine Luftpumpe luftleer gemacht hat.

Die Entladung einer Elektrizitätsmenge auf eine der angegebenen Weisen ist stets von einer Umwandlung ihrer Energie in Energie irgend welcher anderen Art begleitet — indem Schall, Licht, Wärme, chemische Wirkungen und andere Erscheinungen hervorgebracht werden. Diese Wirkungen sind einzeln zu untersuchen.

308. Funkenlänge. Im allgemeinen nimmt die Funkenlänge zwischen zwei Konduktoren mit ihrer Potentialdifferenz zu. Erstere nimmt auch bei einer Verminderung des Luftdrucks zu. Riess fand, dass die Länge etwas mehr als im Verhältnis der Potentialdifferenz zunimmt. Kelvin mass mit Hilfe eines »absoluten Elektrometers« (Art. 282) diejenige Potentialdifferenz, welche erforderlich ist, um zwischen 2 parallelen Platten in verschiedenen Abständen eine Funkenentladung zu erzeugen. Seine genauen Versuche bestätigen die Beobachtung von Riess. De la Rue und Müller haben mit Hilfe ihrer grossen Batterie (Art. 181) gefunden, dass bei einer Potentialdifferenz von 1000 Volt die Funkenlänge nur 0,0127 cm betrug und bei einer Potentialdifferenz von 10,000 Volt 1,369 cm. Ihre 11,000 Silber-Elemente geben einen 1,59 cm langen Funken. Um durch Luft von gewöhnlichem Drucke einen eine Meile langen Funken zu erzeugen,

würde daher eine Potentialdifferenz erforderlich sein, welche diejenige von 1,000,000,0000 Daniell'schen Elementen noch überträfe.

Die Funkenlänge ist in verschiedenen Gasen nicht dieselbe; sie ist z. B. in Wasserstoff 2mal grösser wie in Luft von gleicher Dichte, d. h.: um einen Funken von bestimmter Länge zu erhalten, sind bei Wasserstoff weniger Volt erforderlich als bei Luft. Andererseits ist Kohlensäure für kurze Funken stärker, für lange Funken schwächer als Luft.

Das Potential, welches erforderlich ist, um einen Funken von bestimmter Länge in einem gegebenen Gase zu erzeugen, ist von der als Elektrode benutzten Metallsorte unabhängig, richtet sich jedoch nach ihrer Gestalt. Wenn man an Stelle der Kugeln Spitzen anwendet, so ergiebt sich, dass bei derselben Anzahl von Volt die Spitzen gut für lange, und schlecht für kurze Funken sind.

Nach Peace's Beobachtungen ist ein Minimum-Potential von 3—400 Volt erforderlich, um einen wenn auch noch so kurzen Funken in der Luft zu erzeugen. Handelt es sich um Funken von mindestens 2 mm Länge, so lässt sich die Anzahl Volt, welche zur Erzeugung eines Funkens erforderlich sind, näherungsweise nach der Formel:

$$V = 1500 + 30{,}000\, l$$

berechnen, wo l die Funkenlänge in Zentimetern bedeutet.

Die folgende Tabelle, welche nach den Resultaten Heydweiller's zusammengestellt ist, giebt die Anzahl der Volt, welche zur Funkenerzeugung in der Luft zwischen 2 Kugeln von verschiedener Grösse erforderlich sind, bei 15° C und 76 cm Druck. Bei einer Temperaturabnahme von 3 Grad, oder bei einer Druckzunahme von 8 mm erhöhen sich die Angaben um 1 Prozent.

Radius der Kugeln (in cm)	Abstand der Kugeln (in cm)			
	0,1	0,5	1,0	1,5
	Volt	Volt	Volt	Volt
2,5	4500	18900	33840	47610
1,0	4860	18030	32120	41160
0,5	4950	17790	27810	32400
0,25	4980	16200	20790	22980

Im luftverdünnten Raume ist der Funke länger. Snow Harris ermittelte, dass die Funkenlänge dem Drucke umgekehrt proportional ist, doch ist dieses Gesetz nicht ganz korrekt, sondern nur annähernd richtig für Drucke zwischen 30 und 70 cm Quecksilber. Bei niedrigeren Drucken muss man, wie Gordon kürzlich nachgewiesen hat, eine grössere Potentialdifferenz anwenden, als das Snow Harris'sche Gesetz bestimmt. Hieraus scheint hervorzugehen, dass dünne Luftschichten der durchbohrenden Kraft des Funkens einen verhältnismässig grössern Widerstand bieten, als dicke Schichten, und grössere dielektrische Stärke besitzen. Faraday, welcher 2 Kugeln von ungleicher Grösse benutzte, fand, dass die Funkenlänge grösser war in dem Falle, wo die kleinere Kugel negativ elektrisch ist.

Bei schnell wechselnden Potentialdifferenzen genügt eine geringere Anzahl von Volt, um Funken von gleicher Länge zu erzeugen, denn die Länge hängt von dem Maximal- und nicht von dem mittleren Werte ab. Bei Anwendung einer Scheibe und einer Kugel von 1 cm Durchmesser sind, wie Alexander Siemens zeigte, 3200 Volt bei 0,1 cm Abstand und 11,000 Volt bei 0,5 cm Abstand erforderlich.

Die dielektrische Kraft eines Gases scheint bei einem schwankendem Felde schwächer zu sein als bei einem sich gleich bleibenden. Sind die Volt zur Erzeugung eines Funkens fast ausreichend, so wird ein Polwechsel das Ueberspringen desselben oft begünstigen. Ist überdies ein erster Funke übergesprungen, so wird ein zweiter um so eher auf derselben Bahn gehen. Wahrscheinlich erzeugt der erste Funke auf seiner Bahn chemische Scheidungen, welche einige Zeit vorhalten.

Hertz machte die überraschende Beobachtung, dass das ultra-violette Licht beim Auffallen auf die Kathode die Entladung beschleunigt.

Ein vollkommenes Vakuum ist ein vollkommener Isolator; kein Funke geht durch dasselbe hindurch. Es ist möglich, eine Röhre so vollkommen leer zu pumpen, dass keine unserer Elek-

trisiermaschinen oder elektrischen Apparate imstande sind, auf eine Entfernung von nur einem Zentimeter einen Funken durch den leeren Raum zu senden.

Andererseits verstärkt eine grosse Druckerhöhung auch die dielektrische Stärke der Luft, und verleiht ihr eine grössere Widerstandskraft gegen den Durchgang eines Funkens. Cailletet komprimierte trockene Luft auf 40 bis 50 Atmosphärendrucke und fand, dass selbst der Funke einer kräftigen Induktionsrolle nicht imstande war, einen Weg von 0,05 cm Länge zu überspringen.

309. Flammen und heisse Luft. Von dem Lichtbogen, welcher beim Ueberspringen eines elektrischen Stromes von einer Kohlenspitze auf eine benachbarte entsteht, wird in der 39. Vorlesung die Rede sein. Derselbe ist eine Art Flamme, welche den Strom von der einen Kohlenspitze zur andern leitet, wobei die Kohle verflüchtigt wird. Zur Unterhaltung des Bogens sind nicht mehr als 30 bis 50 Volt erforderlich. Der Wechselstrom-Bogen, welcher in der Luft durch schnell wiederholte Entladungen erzeugt wird, bei einem Potential von 10,000 bis 50,000 Volt, ist eine andere Erscheinung. Derselbe ist offenbar eine endothermische Flamme, in der Stickstoff und Sauerstoff verbrennen.

In heisser Luft sind die Funken länger und direkter, als in kalter. Wird jedoch Luft oder ein anderes permanentes Gas in einem geschlossenen Gefässe erwärmt, ohne dass seine Dichte sich ändert, so sind zur Entladung dieselbe Anzahl Volt erforderlich, vorausgesetzt, dass das Gas nicht bis zur Dissociation erhitzt wird, in welchem Falle wenige Volt zur Entladung genügen.

Flammen und Ströme sehr heisser Luft, wie sie z. B. rotglühendes Eisen ausströmt, sind äusserst gute Leiter der Elektrizität, und wirken bei der Entladung eines geladenen Konduktors noch besser als Metallspitzen. Gilbert zeigte, dass ein elektrischer Körper, der in die Nähe einer Flamme gebracht wurde, seine Ladung verlor; und die schnellste Art, der Oberfläche eines geladenen Körpers von geringer Leitungskraft die ihr durch Reibung oder auf andere Weise mitgeteilte Ladung

zu entziehen, besteht darin, den Körper durch die Flamme einer Spiritus-Lampe zu ziehen. Faraday fand, dass negative Elektrizität auf diese Weise sich leichter entlud, als positive. Stark negativ elektrisierte Flammen werden von Konduktoren abgestossen, positiv elektrisierte dagegen nicht. W. Grove hat gezeigt, dass ein Strom in einem Platin-Drahte entsteht, dessen eines Ende die Spitze und dessen anderes Ende die Basis einer Flamme berührt. Guthrie zeigte, dass eine rotglühende Eisenkugel nur negativ und nicht positiv geladen werden kann. In der Weissglühhitze behält sie keine Ladung, wecher Art sie auch sei.

310. Mechanische Wirkungen. Die hauptsächlichste mechanische Wirkung der Funken-Entladung ist das Zertrümmern und Durchbohren von Glas und andern Isolatoren. Die dielektrische Stärke des Glases ist allerdings viel grösser als die der Luft, aber nicht unendlich gross. Eine 7,5 Zentimeter dicke Glasplatte wurde durch die Entladung einer kräftigen Induktionsrolle durchbohrt. Das sogenannte »zähe« Glas hat eine grössere dielektrische Stärke, als das gewöhnliche Glas und ist schwieriger zu durchbohren. Eine Glasscheibe lässt sich ohne Weiteres durch einen Funken von einer Leydener Flasche oder einer Batterie solcher Flaschen durchbohren, wenn man folgende Vorsichtsmassregeln beobachtet: — Man lege das zu durchbohrende Glas auf einen Block von Glas oder Harz, durch welchen ein Draht geführt wird, dessen eines Ende mit der äussern Belegung der Flasche in Verbindung steht, während das andere Ende gerade an der Oberfläche abgeschnitten ist. Auf der obern Fläche der zu durchbohrenden Glasscheibe steht senkrecht zu ihr ein zweiter Draht, dessen Ende sich genau dem untern Drahte gegenüber befindet, während das andere Ende dieses Drahtes mit einem Metallknopfe versehen ist, welcher den Funken vom Knopfe der Flasche oder des Ausladers empfängt. Um eine gute Isolierung zu sichern, giesst man einige Tropfen Paraffinöl oder Olivenöl auf diejenige Stelle des Glases, wo der Draht dasselbe berührt. Ein Stück trockenes Holz wird bei

gleicher Anordnung von einem kräftigen Funken zersplittert. Eine Oelschicht giebt nicht nach, sondern wird nur so weit durchbohrt, wie eine Luftschicht von 5 bis 6mal grösserer Dicke.

Wird ein Funke durch eine fest verkorkte, mit Wasser angefüllte Glasröhre geführt, so wird letztere durch die plötzliche Ausdehnung der Flüssigkeit in kleine zugespitzte Bruchstücke zertrümmert. Lullin beobachtete zwei merkwürdige Erscheinungen, wenn ein zwischen 2 Metallspitzen befindliches Kartenblatt von einem Funken durchbohrt wird. *Erstens* wird auf jeder Seite ein kleiner Rand aufgeworfen, als wenn das Loch von der Mitte aus auf beiden Seiten nach aussen gebohrt worden wäre. *Zweitens* ergiebt sich, dass, wenn die beiden Spitzen nicht genau einander gegenüber stehen, das Loch dem *negativen* Pole näher ist. Wird jedoch der Versuch in einem luftleeren Raume angestellt, so findet keine solche Verschiebung des Loches statt; dasselbe befindet sich dann genau in der Mitte. Die mechanische Wirkung der Büschelentladung an Spitzen wurde in Art. 47 erwähnt und die eines elektrischen Stromes wurde in der 16. Vorlesung beschrieben.

311. Chemische Wirkungen. Die von elektrischen Strömen erzeugten chemischen Wirkungen sind in der 14. und 19. Vorlesung beschrieben worden. Aehnliche Wirkungen lassen sich durch den elektrischen Funken und durch die ruhige Glühentladung (Art. 314) erzeugen. In der That zeigte Faraday, dass alle Arten der Elektrizität verschiedener Quellen dieselben chemischen Wirkungen zur Folge hatten, und er machte diesen Umstand als einen Beweis für die wesentliche Identität der auf verschiedene Weise erzeugten Elektrizität geltend. Wenn man einige Funken von einer Elektrisiermaschine auf einem Blatt weissen Löschpapiers auffängt, welches mit einer Lösung Jodkalium getränkt ist, so bemerkt man braune Flecken an der Stelle, wo der Funke eine chemische Zersetzung bewirkt und das Jod ausgeschieden hat.

Wird eine Reihe von Funken durch feuchte Luft in einem Gefässe gesandt, so ergiebt sich, dass die Luft die Eigenschaft

erhalten hat, blaues Lackmuspapier rot zu färben. Dies ist, wie Cavendish zeigte, eine Folge der vorhandenen Salpetersäure, welche durch die chemische Verbindung des Stickstoffs und des Sauerstoffs der Luft erzeugt wird. Der Versuch gelingt am besten, wenn man den Funkenstrom einer kleinen Induktionsrolle (Art. 224) durch ein Gefäss gehen lässt, in welchem die Luft stärker komprimiert ist, als dies bei gewöhnlichem Drucke der Fall ist. Jedesmal, wenn eine Elektrisiermaschine in Thätigkeit gesetzt wird, bemerkt man einen eigentümlichen Geruch. Früher hielt man denselben für einen Beweis für das Vorhandensein eines elektrischen Fluidums; jetzt weiss man, dass derselbe eine Folge des Ozons ist, einer modifizierten Form des Sauerstoffs, welche sich vom gewöhnlichen Sauerstoff dadurch unterscheidet, dass sie dichter und chemisch aktiver ist und einen charakteristischen Geruch hat. Die stille Entladung der Influenzmaschine und diejenige der Induktionsrolle begünstigen vorzugsweise die Bildung dieses Körpers.

Der Funke zersetzt Ammoniakgas und schweres Kohlenwasserstoffgas, und bewirkt auch eine mit Explosion verbundene chemische Verbindung, wenn derselbe durch ein Gemenge von Gasen geführt wird. So werden z. B. gleiche Volumina Chlor und Wasserstoff durch den Funken zum Explodieren gebracht; desgleichen Sauerstoff und Wasserstoff, wenn man beide Gase im Verhältnis von 2 Volumen des letztern zu einem des erstern mit einander mischt. Selbst das explodierende Gemisch des gewöhnlichen Kohlengases mit einem 4 bis 10 mal grösseren Volumen gewöhnlicher Luft lässt sich auf diese Weise verpuffen. Der bekannte Versuch mit der sogenannten *elektrischen Pistole* besteht darin, dass man ein kleines Metallgefäss mit explodierenden Gasen anfüllt und dieselben dann durch einen Funken zum Explodieren bringt. Die Funkenentladung wendet man auch bei militärischen Operationen zum Abfeuern von Sprengungen an.

312. Wärmewirkungen. Das Durchströmen der Elektrizität durch ein Widerstand leistendes Medium ist unter allen Umständen von einer Wärmeentwicklung begleitet. Die Gesetze

über die durch Ströme erzeugte Wärme finden sich in der 36. Vorlesung. Die Funkenentladung ist ein von Wärmeentwicklung begleiteter Durchgang der Elektrizität durch ein Medium von grossem Widerstande. Ein Paar Tropfen Aether lassen sich in einem Metalllöffel durch einen elektrischen Funken leicht entzünden. Der Funke einer Elektrisiermaschine oder selbst der eines geriebenen Glasstabes ist heiss genug, um eine gewöhnliche Gaslampe anzuzünden. In gewissen Gegenden Amerikas genügt während der trockensten Jahreszeit das blosse Reiben der Schuhe auf dem Teppiche beim Gehen über die Dielen, um so viel Elektrizität zu erzeugen, dass man Funken aus seinem eigenen Körper ziehen kann, und dass man nur einen Finger auszustrecken nötig hat, um durch einen einzigen Funken das Gas anzuzünden. Schiesspulver lässt sich durch die Entladung einer Leydener Flasche entzünden, nur muss man den Funken verzögern, indem man ihn durch einen feuchten Faden führt, denn sonst würde das Pulver durch den Funken bloss zerstreut werden.

Das von Kinnersley erfundene *elektrische Luftthermometer* [1]) hat den Zweck, die Wärme-Wirkung der Entladung zu untersuchen. Dasselbe besteht aus einem mit Luft gefüllten Glasgefässe, welches mit einer zum Teil mit Wasser oder einer andern Flüssigkeit gefüllten Röhre in Verbindung steht, um Aenderungen des Volumens oder Druckes zu beobachten. In dieses Gefäss führen 2 Metallstäbe, zwischen denen ein dünner Draht gezogen ist oder ein Faden Goldpapier; oder es kann einfach ein Funke von dem einen auf den andern überspringen. Beim Durchgehen des Funkens wird die eingeschlossene Luft erwärmt, dieselbe dehnt sich aus, und veranlasst eine Bewegung der als Index dienenden Flüssigkeitssäule. Die Beobachtungsresultate mit diesen Apparaten sind folgende: Die Wärmewirkung, welche eine gegebene Ladung in einem Drahte von gegebener Länge hervor-

1) Dieser Apparat unterscheidet sich nicht wesentlich von demjenigen, welcher 90 Jahre später von Riess erfunden wurde, dem der Apparat oft zugeschrieben wird. Riess leitete jedoch quantative Gesetze ab, während Kinnersley sich auf qualitative Beobachtungen beschränkte.

bringt, ist dem Quadrate des Querschnitts des Drahtes umgekehrt proportional. Die totale entwickelte Wärme ist zusammen der Ladung proportional und dem Potential, um welches dieselbe fällt. Wenn in der That die gesamte Energie der Entladung zur Wärmeentwicklung gebraucht wird, ohne eine andere Arbeit zu verrichten, so ist die entwickelte Wärme gleich dem Wärmeäquivalent von $\frac{1}{2}$ QV Erg oder gleich $\frac{QV}{2J}$ Wärmeeinheiten, wo J das mechanische Wärmeäquivalent bedeutet ($J = 42$ Millionen, da 42×10^6 Erg $= 1$ Calorie) und Q und V in C.G.S Einheiten ausgedrückt sind.

Findet eine kräftige Entladung durch sehr dünne Drähte statt, so können dieselben bis zur Rotglühhitze erhitzt und durch die entwickelte Wärme sogar geschmolzen werden. Van Marum erhitzte einst auf diese Weise durch eine kräftige Entladung einen Draht von 70 Fuss Länge. Ein schmaler Streifen Zinnfolie wird durch die Ladung einer Leydener Flasche oder einer Batterie ohne weiteres geschmolzen. Ein Stück Blattgold wird in gleicher Weise durch eine kräftige Entladung verflüchtigt; und Franklin benutzte diese Eigenschaft zu einem Verfahren, um *Portraits* und andere Muster zu vervielfältigen, welche zuerst auf Karten ausgeschnitten und dann in einer Silhouette von metallischen Teilchen auf einer zweiten Karte reproduziert wurden, indem man über dieselben einen Bezug von Blattgold oder Blattsilber legte, welches wiederum mit einem Stück Papier bedeckt war, und dann die Ladung einer Leydener Batterie durch das Blatt hindurchschickte.

313. Licht-Wirkungen. Die Lichtwirkungen der Entladung zeigen viele schöne, interessante Abwechslungen unter verschiedenen Umständen. Der *Entladungsfunke* ist gewöhnlich ein dünner glänzender Lichtstreif. Findet die Entladung zwischen zwei Metallkugeln statt, die nur durch einen kurzen Zwischenraum von einander getrennt sind, so erscheint der Funke gewöhnlich als eine einfache dünne glänzende Linie. Ist der Abstand jedoch einige Zentimeter gross, so bewegt sich der Funke

in einer unregelmässigen Zick-Zack-Linie. Auf alle Fälle nimmt er seine Bahn längs der Linie von geringstem Widerstande, indem das Vorhandensein kleiner, in der Luft umherfliegender Staubteilchen vollkommen genügt, um die Art der Zickzackbahn zu bestimmen. In vielen Fällen zeigt der Funke merkwürdige Verzweigungen und Verästelungen, wovon Fig. 157 ein Bild

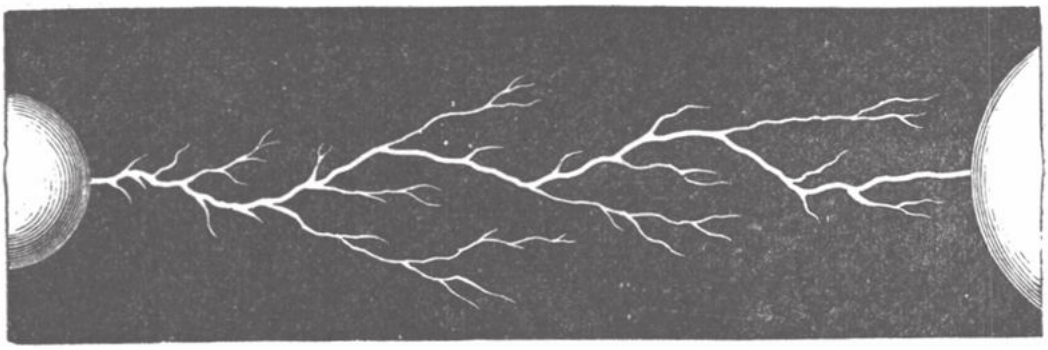


Fig. 157.

giebt (in $\frac{1}{8}$ der natürlichen Grösse). Photographieen des Blitzes zeigen fast immer eine ähnliche Verzweigung. Die Zweige weisen stets nach der negativen Elektrode. Die Entladung einer Leydener Flasche giebt einen viel helleren, kürzeren und geräuschvolleren Funken, als wenn man dem Kollektor einer Maschine direkt einen Funken entzieht. Die Länge (vergl. Art. 308) hängt von dem Potential, von dem Drucke und der Temperatur der Luft ab, in welcher die Entladung stattfindet. Der Glanz hängt besonders von der Menge der sich entladenden Elektrizität ab. Die Farbe des Funkens variiert mit der Beschaffenheit der Metallflächen, zwischen welchen die Ausladung stattfindet. Denn der Funke reisst beim Ueberspringen kleine Teile von den Metalloberflächen ab und verflüchtigt dieselben. Zwischen Kupfer oder Silber nimmt der Funke eine grüne Färbung an, während derselbe bei Eisen rötlich aussieht. Untersucht man den Funken mit dem Spektroskop, so entdeckt man in demselben die charakteristischen Streifen der weissglühenden Dämpfe der verschiedenen Metalle.

314. Büschelentladung, Glimmentladung. Wird eine Elektrisiermaschine stark in Thätigkeit gesetzt, ohne dass man

Funken aus ihrem Kollektor zieht, so bemerkt man (in einem dunkeln Zimmer) ein feines divergierendes *Büschel* von blassblauem Lichte, welches dem Metallknopfe an demjenigen Ende entströmt, welches am weitesten von dem Saugkamme entfernt ist; diese Art der Entladung ist stets von einem zischenden oder knisternden Geräusch begleitet. Die Büschelentladung besteht aus unzähligen feinen zweigähnlichen Verästelungen, von denen Fig. 158 eine Art darstellt. Der Glanz und die Grösse des

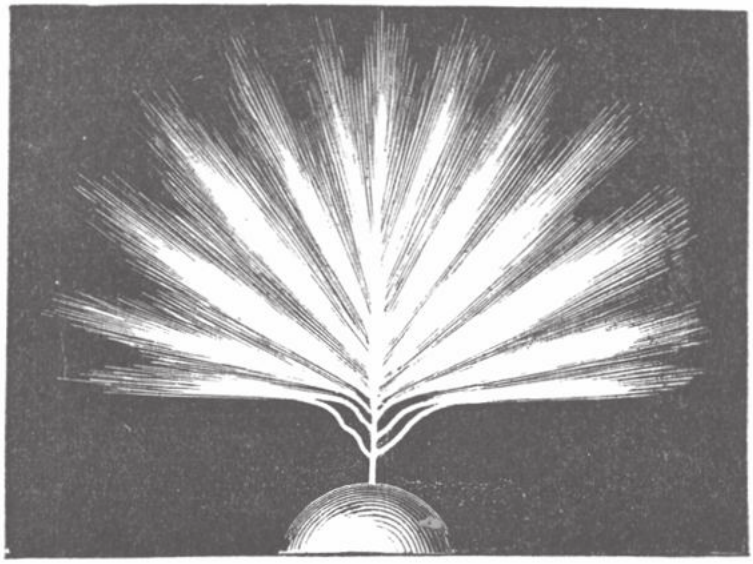


Fig. 158.

Büschels lässt sich dadurch erhöhen, dass man in einiger Entfernung von demselben eine flache Scheibe aufstellt. Bei einer kleinern Kugel oder bei einem stumpf zugespitzten Drahte erscheint das Büschel kleiner, ist jedoch deutlicher und kontinuierlicher. Wenn die Entladung zwischen 2 Kugeln stattfindet, so sind die Büschel stets verschieden. Die Büschelentladung ist grösser und mehr verzweigt bei einer + Ladung als bei einer negativen. Doch ist das negative Büschel hübscher gestaltet als das positive. Wheatstone fand mit seinem Rotationsspiegel, dass die Büschelentladung in Wirklichkeit eine Reihe von aufeinander folgenden Teilfunken in raschen Intervallen ist. In jedem Falle wird durch die Büschelentladung Metallstaub von der Elektrode abgerissen.

Wird das stumpfe Drahtende oder der abgerundete Kon-

duktor durch eine Spitze ersetzt, so verschwindet das Büschel und an seine Stelle tritt ein ruhiges kontinuierliches Glimmen, da, wo die elektrischen Luftteilchen von der Spitze wegströmen. Hindert man diese Konvektions-Ströme, so tritt statt des Glühens wieder ein Büschel auf. Wird eine negative Ladung an einer Spitze entladen, so scheint bisweilen das Glühen von der Oberfläche des Konduktors durch einen dunkeln Raum getrennt zu sein, in welchem die Luft, ohne zu leuchten, doch die Elektrizität weiter leitet. Diese Erscheinung, welche Faraday die *„dunkle" Entladung* nannte, lässt sich sehr gut beobachten, wenn die Elektrizität durch verdünnte Luft und andere Gase in leeren Röhren entladen wird. Eine Funkenentladung kann sich in eine Büschelentladung verwandeln, wenn die Oberfläche der Elektrode durch wiederholte Entladungen kleine Vertiefungen erhält oder rauh wird. Daher ist es bei allen Versuchen über Funkenentladung von Wichtigkeit, dass die Entladungskugeln ganz *glatte* Oberflächen haben.

315. Entladungen in luftverdünnten Räumen. Findet die Entladung in Glasröhren oder Glasgefässen statt, aus denen die Luft zum Teil ausgepumpt ist, so lassen sich manche bemerkenswerte und schöne Lichterscheinungen beobachten. Eine gewöhnliche Form des Gefässes ist das »elektrische Ei« (Art. 227), eine Art ovaler Flasche, welche sich an eine Luftpumpe schrauben lässt und die mit Metallknöpfen versehen ist, um die Funken hineinzuführen. Gewöhnlich benutzt man »luftleere Röhren«, wie dieselben von dem berühmten Geissler angefertigt werden. Diese sind einfach Röhren aus dünnem Glase, die zu einer Kugel oder Spirale geblasen sind und welche 2 Elektroden von in das Glas geschmolzenen Platindrähten haben; die Röhren werden zugesiegelt, nachdem die Luft zum Teil durch eine Quecksilber-Luftpumpe entfernt ist. Von diessen Geissler'schen Röhren sind die brauchbarsten diejenigen, welche aus zwei durch eine sehr enge Röhre verbundenen Kugeln bestehen, Fig. 159, da die Lichtwirkungen in dem verengten Teile gewöhnlich intensiver sind. Solche Röhren werden durch einen Funken von

einem Elektrophor oder einer Influenzmaschine sofort erleuchtet; doch ist es gebräuchlicher, den Funken einer Induktionsrolle (Art. 224) durch sie hindurchgehen zu lassen. Eine Rolle, welche

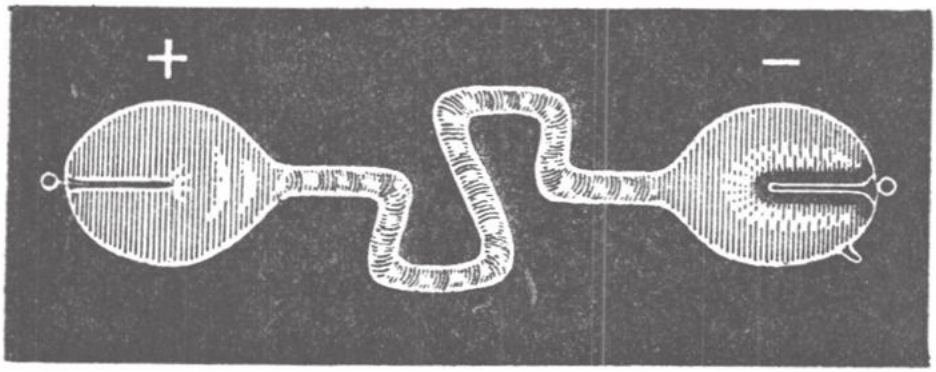


Fig. 159.

in der Luft einen Funken von 1 cm giebt, erleuchtet eine luftverdünnte Röhre von 12 bis 16 cm Länge. Hat man eine Wechselstrom-Quelle, so benutzt man zweckmässig kleine Transformatoren zur Erleuchtung der Röhren.

Bevor die Röhren luftleer gepumpt sind, geht der Funke durch dieselben, ohne dass irgend welche ungewöhnlichen Erscheinungen dabei auftreten. Fängt man an die Luft auszupumpen, so sind die Funken weniger scharf begrenzt und es breiten sich dieselben aus, so dass sie die ganze Röhre ausfüllen, wobei ihre Färbung bleich und ihre Gestalt nebelig wird. Die Kathode zeigt ein schönes bläuliches oder violettes Glimmlicht, welches von dem Konduktor durch einen schmalen, dunklen Raum getrennt ist, während an der Anode bloss ein einziger kleiner heller Lichtstern bemerkt wird. Häufig zerlegt sich das Licht in eine Reihe von Schichten oder Lichtflecken von kelchähnlicher Gestalt, welche zwischen dunklen Stellen hin und her vibrieren. Im Stickstoff ist das violette Licht um die Kathode herum sehr hell, während das übrige Licht eine rosa Färbung hat. Im Sauerstoff ist der Unterschied nicht so deutlich. Im Wasserstoff ist die Entladung von bläulicher Farbe, ausgenommen an den engen Stellen der Röhren, wo man ein schönes Karmoisinrot erblickt. In Kohlensäure ist das Licht merklich weiss.

Von der Kathode werden Metallteilchen abgerissen und von der Oberfläche derselben weggeschleudert. Die Kathode ist auch gewöhnlich die wärmere, falls beide Elektroden von gleicher Grösse sind. Wird die Anode erwärmt, und die Kathode abgekühlt, so findet keine Entladung statt. In der Nähe einer bis zur Rotglühhitze erwärmten Platinspirale im Innern der Röhre hört das Leuchten auf. Wird die Kathode bis zur Weissglühhitze erwärmt, so verschwindet das Leuchten ebenfalls, und das Gas leitet ohne zu leuchten. Man hat auch beobachtet, dass das Licht dieser Entladungen im leeren Raume reich an jenen Strahlen ist, welche Phosphoreszenz und Fluoreszenz erzeugen. Man hat daher viele schöne Erscheinungen, wenn man zur Anfertigung der Röhren Uran-Glas verwendet, welches mit schönem grünen Lichte fluoresziert, und wenn man in eine äussere Glasröhre Lösungen von Chinin oder andere fluoreszierende Flüssigkeiten thut.

316. Erscheinungen in stark luftverdünnten Räumen. Wenn man die Verdünnung der Luft bis zu einem sehr hohen Grade fortsetzt, so vergrössert sich, wie Crookes gefunden hat, die Breite des dunklen Raumes, welcher das negative Glimmlicht vom negativen Pole trennt, und durch diesen Raum fliegen elektrisierte Moleküle auf parallelen Bahnen, welche senkrecht zur Oberfläche der Kathode stehen. Wenn die Verdünnung der Luft schon so weit getrieben ist, dass der dunkle Raum die ganze Röhre oder die ganze Kugel einnimmt, so beginnen die Glaswände schön zu phosphoreszieren. Diamanten, Rubine und sogar weisse gepulverte Alaunerde, in die Röhre gebracht, beginnen stark zu phosphoreszieren, sobald die Kathodeentladung gegen sie gerichtet wird, und wenn man (durchsichtige oder undurchsichtige) Körper vor die Elektrode stellt, so bilden sich auf der gegenüberliegenden Wand des Gefässes scharf abgegrenzte **Schatten** dieser Körper, als wenn sie einigen der fliegenden Moleküle den Durchgang versagten und dieselben verhinderten, die gegenüberliegende Wand zu treffen. In Fig. 160 besteht die Kathode K aus einer schwach konvexen Scheibe

von Aluminium. In den Weg, den die Entladung nimmt, hat man ein aus Glimmer geschnittenes Kreuz gestellt. Sein Schatten S erscheint am Ende der Röhre, welche rings um den beschatteten Teil phosphoresziert. Die Anode befindet sich entweder in A oder *a*. Leicht bewegliche Fähnchen werden in Umdrehung versetzt, wenn man sie in der Bahn der Entladung aufstellt. Crookes betrachtete diese Kathode-Entladung als *strahlende* Materie in einem ultragasförmigen Zustande. Eine in die Bahn der Kathode-Entladung gestellte Scheibe wird dadurch + elektrisch. Die Kathode-Entladung ist nicht allein von dem als Kathode verwendeten Metall, sondern auch von der Lage der Anode unabhängig. Jede Raumbeschränkung um die Kathode herum hindert die Entladung. Aehnliche Erscheinungen hat man in luftleeren Röhren auch ohne innere Elektroden beobachtet. Hertz machte die Entdeckung, dass diese Kathodestrahlen durch Glas, Glimmer und andere durchscheinende Körper nicht hindurchgehen, wohl aber durch Metallfolie. Lenard benutzte eine Vakuumröhre, welche an dem einen Ende mit einem »Fenster« von Aluminiumfolie versehen war, und es gelang ihm, die Kathodestrahlen in die Luft austreten zu lassen (in der sie absolut nicht erzeugt werden können). Er fand, dass sie ihre bemerkenswerte Eigenschaft, andere Körper zum Phosphoreszieren zu bringen, beibehielten.

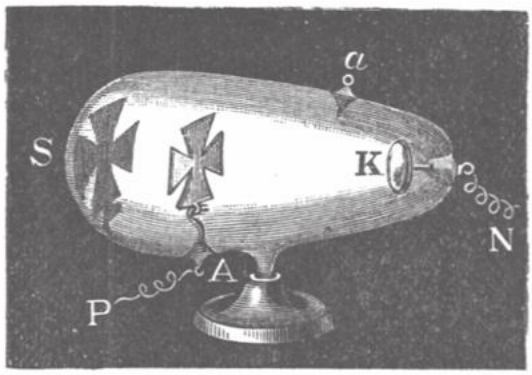


Fig. 160.

Stark luftverdünnte Räume zeigen einen enormen Widerstand, der offenbar davon herrührt, dass die elektrische Entladung beim Verlassen der Elektrode auf eine gewisse Schwierigkeit stösst. Die molekulare Leitungsfähigkeit des verdünnten Gases ist selbst sehr gross. Bei einer gleichen Anzahl von Molekülen ist dieselbe grösser als die der Metalle.

Holtz hat in neuerer Zeit »elektrische Schatten« mittelst

Entladungen in der Luft bei gewöhnlichem Drucke erzeugt, zwischen den Polen der Influenzmaschine (Art. 53), wobei die Entladung zwischen einer Spitze und einer mit Seide umwickelten Scheibe statt fand, welche die Schatten auffängt.

317. Schichten. Die Schichtungen sind sehr sorgfältig von Gassiot, Spottiswoode und De la Rue untersucht worden. Die bisher gesammelten Thatsachen sind folgende: Die Schichten entstehen an der Anode bei einem gewissen Drucke und treten um so zahlreicher auf, je stärker die Luft verdünnt wird, bis zu einer gewissen Grenze, wo sie dicker und weniger zahlreich erscheinen, bis die Verdünnung so weit fortgesetzt ist, dass eine Entladung nicht mehr stattfindet. J. J. Thomson fand, dass die Schichtungssäule einen nahezu konstanten elektrischen Widerstand der ganzen Länge nach zeigte, obgleich der Widerstand jenseits derselben in der Nähe der Kathode viel grösser war. In einer Vakuum-Röhre von mehr als 15 m Länge war die Entladung der ganzen Länge nach geschichtet, nur nicht in der Nähe der Kathode. Wird die Kathode vorwärts bewegt, so bewegen sich die Schichten mit. Die Schichten flackern sogar, falls der kontinuierliche Strom einer Batterie von einigen 1000 Elementen verwendet wird. Bei einer besondern Stromdichte findet ein Maximum der Beständigkeit statt. Die Schichten sind heisser, als die zwischen ihnen befindlichen Stellen. Die Zahl und Lage der Schichten richtet sich nicht allein nach der Stärke der Verdünnung, sondern auch nach der Potentialdifferenz der Elektroden. Jeder Teil der Schichtungssäule wirkt wie eine besondere Entladung. Wenn die Schichten durch die intermittierenden Entladungen der Induktionsrolle erzeugt werden, so ergiebt sich durch Prüfung mit einem Rotationsspiegel, dass sie sich von der Anode zur Kathode bewegen.

Schuster hat gezeigt, dass die Entladung der Elektrizität durch Gase ein Prozess ist, welcher mit dem der Elektrolyse (Art. 232) Aehnlichkeit hat, und der von einer Zerlegung der Gasmoleküle und einem fortwährenden Austausch der Atome zwischen denselben begleitet ist. Die Erzeugung von Ozon (Art. 311)

und die an der Kathode beobachteten Erscheinungen (Art. 316) unterstützen diese Ansicht. Abgesehen von andern Beweisen wollen wir noch die überraschende Entdeckung von Hittorf erwähnen, dass nämlich schon eine ganz geringe Anzahl von Elementen im Stande sind, durch Gas bei gewöhnlichen Drucken einen Strom zu senden, vorausgesetzt, dass in der Nähe eine Funkenentladung vor sich geht. J. J. Thomson findet, dass jene Gase, welche beim Erhitzen zersetzt oder in Moleküle geschieden werden, so dass freie Atome vorhanden sind, ebenfalls gute Leiter sind. Er betrachtet die chemische Zersetzung als einen wesentlichen Faktor der Entladung in Gasen.

Die Entladungen in luftleeren Röhren werden bei jedem Grade der Verdünnung von dem Magnet beeinflusst; derselbe wirkt auf dieselben wie auf biegsame Leiter. Unter gewissen Bedingungen ist die Entladung auch für die Nähe eines Konduktors ausserhalb der Röhre empfindlich, und zieht sich von der Seite, wo derselbe genähert wird, zurück. Dieser empfindliche Zustand scheint die Folge eines periodischen Intermittierens in der Entladung zu sein; ein Intermittieren oder teilweises Intermittieren in der Strömung würde wahrscheinlich ebenfalls die Erzeugung von Schichten erklären.

318. Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Entladung. Die erste Anwendung des Rotationsspiegels zur Untersuchung von Erscheinungen von kurzer Dauer machte Wheatstone, welcher auf diese Weise »die Geschwindigkeit der Elektrizität« in leitenden Drähten zu messen versuchte. Seine Resultate gaben jedoch nicht die *Geschwindigkeit der Elektrizität*, sondern die Zeit, welche eine ganz bestimmte Elektrizitätsmenge gebraucht, um durch einen Konduktor von bedeutendem Widerstande und beträchtlicher Kapazität zu fliessen. Im Rotationsspiegel betrachtet, würde ein Funke von begrenzter Dauer als ein langer Streifen erscheinen. Eine derartige Verlängerung konnte man wahrnehmen, wenn eine Leydener Flasche durch einen Kupferdraht von einer halben Meile Länge entladen wurde; und wenn der Schliessungsbogen an drei Stellen unterbrochen wurde, in

der Mitte und an beiden Enden des Drahtes, so erhielt man 3 Funken, welche im Spiegel eine seitliche Verschiebung zeigten, indem sie (bei der angewendeten bestimmten Rotationsgeschwindigkeit) angaben, dass der mittlere Funke den 1,152,000 Teil einer Sekunde später erfolgte als die an den Enden. Wheatstone schloss hieraus auf eine Geschwindigkeit von 288,000 Meilen pro Sekunde. Faraday zeigte jedoch, dass die scheinbare Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Elektrizitätsmenge von der Kapazität des Konduktors beeinflusst werden müsse; und er sagte sogar voraus, dass ein untergetauchtes, isoliertes Kabel, da es wie eine Leydener Flasche wirkt (vergl. Art. 296) und geladen werden muss, bevor das Potential an dem entfernten Ende steigen kann, das scheinbare Strömen der Elektrizität durch dasselbe verzögert. Professor Fleeming Jenkin sagt von einem der Atlantischen Kabel, dass man nach erfolgter Berührung mit der Batterie an dem einen Ende 0,2 Sekunden lang keine Wirkung an dem andern Ende verspüren kann, und dass dann der aufgenommene Strom allmählich zunimmt, bis er nach circa 3 Sekunden sein Maximum erreicht und dann verschwindet. Diese Verzögerung ist dem Quadrate der Länge des Kabels und ferner seiner Kapazität und seinem Widerstande proportional; daher wird dieselbe bei langen Kabeln recht empfindlich, da sie die Schnelligkeit des Telegraphierens reduziert. In der That giebt es keine bestimmte angebbare »Geschwindigkeit der Elektrizität«. Bei in der Luft ausgespannten Drähten ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer schnellen elektrischen Vibration gleich der Geschwindigkeit des Lichts. Aber bei langsamen Vibrationen, wie z. B. bei denen von Tönen, welche durch Luftlinien oder Kabel eines Telephons gehen, ist die Geschwindigkeit unter Umständen viel geringer.

Ein sehr einfacher Versuch setzt den Leser in den Stand, die ausserordentlich kurze Dauer des Funkens einer Leydener Flasche zu bethätigen. Man nehme eine runde Scheibe von Kartenpapier, welche mit schwarzen und weissen Sektoren bemalt ist, und versetze dieselbe in sehr schnelle Rotation, so dass

man bei gewöhnlichem Lichte nur eine einzige graue Fläche erblickt. Wird diese durch den Funken einer Leydener Flasche erleuchtet, so scheint sie absolut still zu stehen, wie schnell sich dieselbe auch drehen mag. Ein Blitz ist ebenfalls momentan; es ist völlig unmöglich, zu bestimmen, an welchem Ende der Blitz beginnt [1]).

319. Elektrische Staubfiguren. Ueber die Oberfläche schlechter Leiter kann die Elektrizität sich langsam ausbreiten. Lichtenberg erfand eine sinnreiche Methode, die Verteilung der Elektrizität mittelst gewisser Staubfiguren zu untersuchen. Man nehme eine geladene Leydener Flasche und schreibe mit dem Knopfe derselben auf einem Schellackkuchen oder einer trockenen Glasscheibe. Dann siebe man durch ein Stück Musselin ein Gemenge von gepulvertem Mennige und Schwefel über den

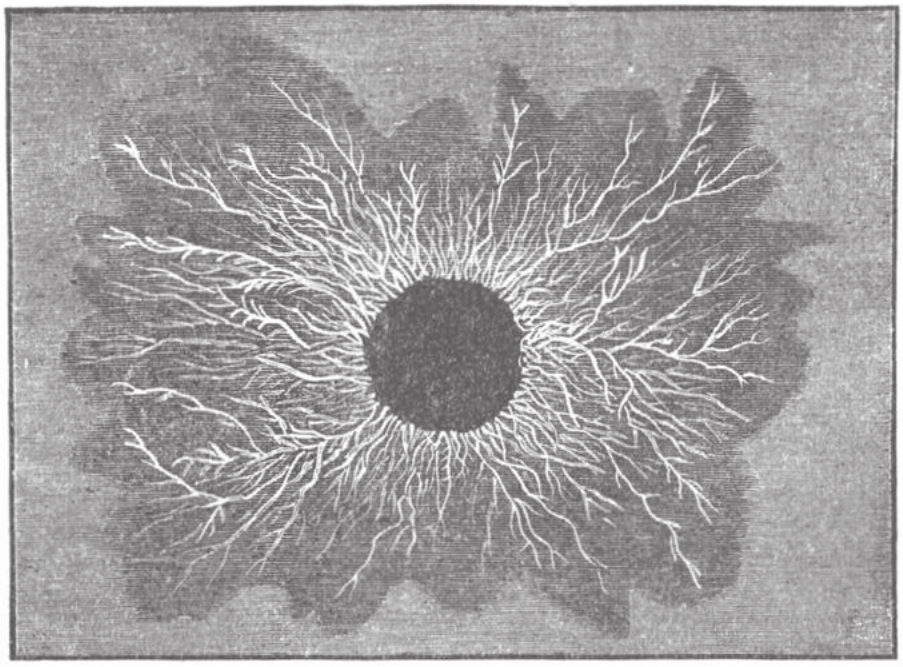


Fig. 161.

Schellackkuchen (Zinnober und Lycopodiumpulver thun dieselben Dienste). Die beiden Pulver reiben sich bei diesem Vorgange an einander, die Mennige wird +, der Schwefel negativ. Des-

1) Bald scheint der Blitz aus den Wolken nach unten, bald von der Erde nach oben zu schlagen. Dies ist eine optische Täuschung, welche eine Folge der ungleichmässigen Empfänglichkeit ist, welche verschiedene Teile der Netzhaut des Auges gegen das Licht zeigen.

halb wird der Schwefel von denjenigen Teilen der Scheibe angezogen, welche + elektrisch sind, und setzt sich in eigentümlichen, verzweigten gelben Strahlen fest, wie es die Fig. 161 zeigt. Die Mennige setzt sich in kleinen roten Haufen und Flecken an denjenigen Stellen fest, wo negative Elektrizität ist. Diese runden, roten Flecke beweisen, dass die — Entladung in Form eines *Windes* oder einer stillen Entladung stattgefunden hat. Die verzweigten gelben Strahlen beweisen, dass die + Entladung die Natur einer Büschelentladung hat (wovon man sich in der That durch das Gehör überzeugen kann). Fig. 162 zeigt

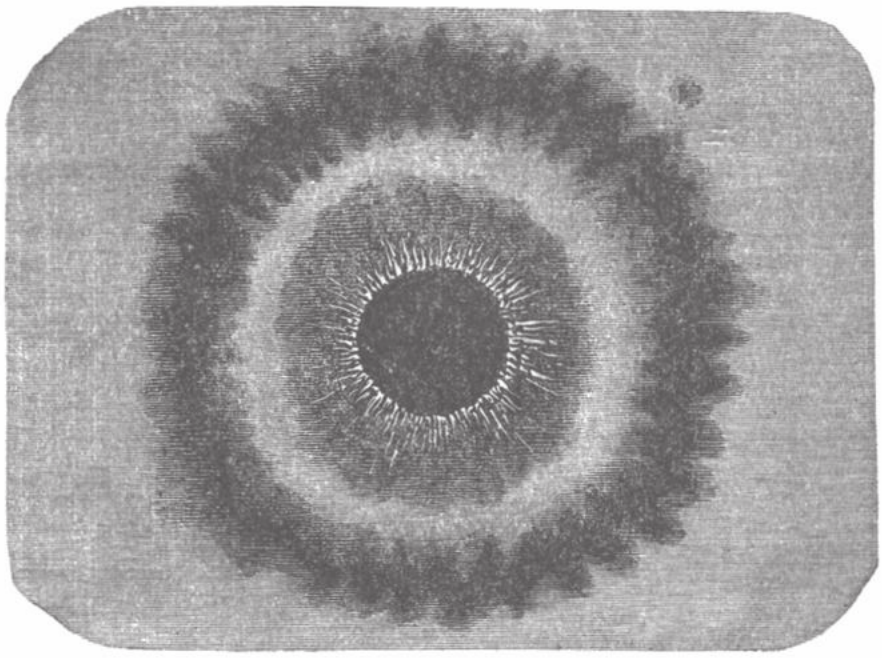


Fig. 162.

diejenige *Lichtenberg'sche Figur*, welche entsteht, wenn man den Knopf der Leydener Flasche an den Mittelpunkt einer Schellackscheibe hält, welche vorher mit Flanell gerieben worden ist, so dass die negative Elektrizität auf allen Seiten nach der im Mittelpunkte befindlichen + Ladung gezogen wird. Mittelst dieser Pulver lässt sich auch feststellen, in welcher Weise Oberflächen beim Reiben, und pyroelektrische Krystalle (Art. 74) beim Abkühlen elektrisch geworden sind.

Wird gepulverter Turmalin erwärmt und dann über eine Glasscheibe gesiebt, welche vorher unregelmässig elektrisiert worden ist, so ergeben sich ähnliche, doch nicht so scharf begrenzte Figuren.

Hauch-Bilder lassen sich herstellen, wenn man eine Münze oder ein Stück Metall, welches auf eine trockene Glasscheibe gelegt ist, elektrisiert und dann auf das Glas haucht, da wo die Münze lag; auf diese Weise erzeugt man eine schwache Abbildung derselben auf der Oberfläche des Glases. F. J. Smith findet, dass in dem Falle, wo man eine Münze oder einen Kupferstich auf eine photographische Trockenplatte legt, und man dann einen Funken einer Induktionsrolle überspringen lässt, die Platte ein unsichtbares Bild empfängt, welches sich photographisch entwickeln lässt.

320. Physiologische Wirkungen. Die physiologischen Wirkungen des Stromes sind in der 20. Vorlesung beschrieben worden. Diejenigen Wirkungen, welche die Funkenentladung hervorbringt, sind ihrem Charakter nach plötzlicher, doch im Allgemeinen von derselben Natur. Selten ist der Tod die direkte Folge. Der Schlag verursacht eine plötzliche Unterbrechung des Atmens, wie beim Ersticken infolge Ertrinkens. Die Leichname von durch Blitz getöteten Personen zeigen häufig Spuren rötlicher Färbung an denjenigen Stellen, wo der Blitz beim Durchgange durch die Gewebe diese zerrissen oder vernichtet hat. Bisweilen haben diese Spuren ein sonderbares, verzweigtes Aussehen, als wenn der Funke bei seinem Eintritte sich netzartig über die Oberfläche ergossen hätte.

321. Entweichung der Ladung. Ein geladener Konduktor mag noch so gut isoliert und die umgebende Luft noch so trocken sein, so verliert er trotzdem langsam seine Ladung und ist nach einigen Tagen vollständig entladen. Die Art und Weise des Verlorengehens der Ladung ist jedoch nicht gleichförmig. Der Verlust ist der Potentialdifferenz zwischen dem Körper und der Erde annähernd proportional. Deshalb ist der Verlust anfangs verhältnismässig grösser als nachher, und ebenso ist derselbe für stark geladene Körper grösser als für schwach geladene. Das Gesetz, nach welchem die Ladung entweicht, hat daher Aehnlichkeit mit Newton's Gesetz der Abkühlung, nach welchem die verhältnismässige Abkühlung eines heissen

Körpers der Temperaturdifferenz zwischen ihm und den Gegenständen seiner Umgebung proportional ist. Wird das Potential des Körpers in gleichen Zeitintervallen gemessen, so findet man, dass dasselbe in fallender geometrischer Reihe abgenommen hat; oder die Logarithmen der Potentiale nach gleichen Zeitintervallen bilden eine arithmetische Reihe. Der Verlust ist jedoch verhältnismässig stärker bei — elektrischen Oberflächen als bei + elektrischen.

Dies lässt sich durch folgende Gleichung wiedergeben:

$$V_t = V_0 e^{-pt},$$

wo V_0 das ursprüngliche Potential bedeutet, und V_t das Potential nach der Zeit t. Die Zahl e hat den Wert 2,71828 ... (die Basis der natürlichen Logarithmen), p bedeutet den »Entweichungs-Koeffizienten«, welcher von der Temperatur, dem Drucke und der Feuchtigkeit der Luft abhängt. Dieselbe Formel gilt für die Entladung eines Kondensators von der Kapazität K durch einen Widerstand R, falls $1 : K.R$ statt p gesetzt wird.

322. Positive und negative Elektrisierung. Dem Leser werden gewiss während dieser ganzen Vorlesung die häufigen Unterschiede im Verhalten der + und — Elektrizität aufgefallen sein. Die auffallende Verschiedenheit der Lichtenberg'schen Figuren, die Verschiebung der Durchbohrungsstelle bei dem Lullin'schen Versuche, das ungleiche Streben, von den Oberflächen zu entweichen, die ungleiche Einwirkung der Wärme auf + und — Ladungen, die bemerkenswerten Unterschiede bei den verschiedenen Arten der Büschel- und Glimmentladung, alles dieses sind Dinge, welche unsere Aufmerksamkeit beanspruchen. Gassiot beschrieb die Erscheinung in luftleeren Röhren als die Folge einer Kraft, welche vom negativen Pole ausging. Crookes' Versuche in Räumen, wo die Luft sehr stark verdünnt ist, zeigen, dass die Moleküle von der negativen Elektrode heftig entladen werden, wobei die Flügel einer kleinen, in solche Röhren eingeschlossenen Windmühle von der Seite, welche von der negativen Entladung getroffen wird, bewegt werden. Werden in einer luftleeren Röhre trichterförmige Ab-

teilungen angebracht, so ist, wie Holtz gefunden hat, der Widerstand bedeutend geringer, wenn die Oeffnungen der Trichter nach der negativen Elektrode gerichtet sind. Diese Thatsachen sind bis jetzt noch durch keine der existierenden Theorieen über Elektrizität erklärt.

Der Verfasser dieser Vorlesungen ist geneigt, folgende Ansicht über diesen Gegenstand aufzustellen: Wenn die Elektrizität wirklich etwas einfaches und nichts dualistisches ist, so muss entweder die sogenannte + Elektrizität oder die — Elektrizität derjenige Zustand sein, in welchem mehr Elektrizität vorhanden ist, als in dem umgebenden Raume, und die andere Art muss ein Zustand sein, in welchem weniger Elektrizität vorhanden ist. Im Art. 7 wurde erwähnt, dass wir bei dem jetzigen Stande der Wissenschaft nicht genau wissen, ob + Elektrizität wirklich ein Mehr oder ein Weniger von Elektrizität ist. Nun scheinen einige der in diesem Artikel angeführten Erscheinungen darauf hinzudeuten, dass die sogenannte »negative« Elektrizität in Wirklichkeit der Zustand des Mehr ist. Insbesondere weist hierauf der Umstand, dass das Entweichen der Ladung für — Elektrizität grösser ist, als für +; weil das Gesetz vom Entweichen der Ladung das genaue Gegenteil des Gesetzes vom Entweichen der Wärme ist, bei welchem es ganz sicher ist, dass bei gleichen Temperaturdifferenzen zwischen einem Körper und seiner Umgebung das Entweichen der Wärme für höhere Temperaturen verhältnismässig schneller stattfindet als für niedrige; oder der Körper, welcher in Wirklichkeit wärmer ist, seine Wärme am schnellsten verliert.

XXV. VORLESUNG: *Atmosphärische Elektrizität.*

323. Die Erscheinungen der atmosphärischen Elektrizität sind zweierlei Art: Die wohlbekannten elektrischen Erscheinungen des Gewitters und diejenigen der beständigen geringen Elektrisierung in der Luft, welche man am besten bei schönem

Wetter beobachten kann. Die Erscheinungen des Nordlichts bilden eine dritte Gruppe dieses Gegenstandes.

324. Das Gewitter, eine elektrische Erscheinung. Die knisternden Funken, welche sich einer Elektrisiermaschine oder einer Leydener Flasche entziehen lassen, führten die ersten Versuchsansteller Hawkesbee, Newton, Wall, Nollet und Gray zu der Vermutung, dass der Blitz und der Donner eine Folge elektrischer Entladungen seien. Im Jahre 1749 kam Benjamin Franklin, welcher die Bemerkung gemacht hatte, dass der Blitz fast alle von elektrischen Funken bekannten Eigenschaften [1]) besitzt, auf den Gedanken, die von ihm entdeckte elektrische Wirkung von Spitzen (Art. 46) an Gewitterwolken zu versuchen, und er entzog ihnen auf diese Weise eine elektrische Ladung. Er machte daher den Vorschlag, an einem hohen Turme einen zugespitzten Eisenstab zu befestigen. Bevor er sein Vorhaben ausführen konnte, errichtete Dalibard, der Franklin's Vorschlag aufnahm, in Marly-la-ville in der Nähe von Paris einen 40 Fuss hohen Eisenstab, mit Hilfe dessen es ihm 1752 gelang, einer vorbeiziehenden Wolke Funken zu entziehen. Franklin erreichte seinen Zweck kurze Zeit darauf in anderer Weise. Er liess während eines Gewitters einen Papierdrachen steigen, und es ergab sich, dass die nass gewordene Schnur die Elektrizität zur Erde leitete und dann zahlreiche Funken gab. Diese zog er aus einem an die Schnur gebundenen Schlüssel, indem er zur

---

1) Franklin zählt die Uebereinstimmung zwischen Elektrizität und Blitz folgendermassen auf: Erzeugung von Licht; Farbe des Lichtes; Zickzackrichtung; schnelle Bewegung; werden durch Metalle weiter geleitet; Geräusch beim Explodieren; Leitungsfähigkeit in Wasser und Eis; Zerreissen von unvollkommenen Leitern; Tötung von Tieren; Schmelzen von Metallen; Verbrennen entzündbarer Körper, schwefelartiger Geruch (vom Ozon herrührend, wie wir jetzt wissen); früher hatte er bereits gefunden, dass Nadeln sowohl durch Blitz, als auch durch den elektrischen Funken magnetisiert werden konnten. Er machte auch auf die Aehnlichkeit des blass-blauen Lichtes aufmerksam, das man während eines Gewitters oben an den Masten der Schiffe bemerkte (die Seeleute nennen es das St. Elm's Feuer) und auf die Glühentladung an Spitzen.

Sicherheit zwischen seine Hand und den Schlüssel ein seidenes Band hielt. Leydener Flaschen konnte er durch die aus den Wolken gezogenen Funken laden und alle andern elektrischen Wirkungen hervorbringen. Der Beweis der Identität war vollständig. Der Drachenversuch wurde von Romas wiederholt, welcher aus einer Metallschnur 9 Fuss lange Funken zog, ebenso von Cavallo, welcher viele wichtige Beobachtungen über atmosphärische Elektrizität anstellte. Im Jahre 1753 wurde Richmann, welcher mit einem dem von Dalibard ähnlichen Apparate experimentierte, in St. Petersburg von einer plötzlichen Entladung getroffen und getötet.

325. Theorie des Gewitters. Feste und flüssige Körper lassen sich nicht in ihrem Innern laden; sind sie vollständig geladen, so befindet sich die Elektrizität nur an ihrer Oberfläche (vergl. Art. 31). Gase und Dämpfe dagegen können, da sie aus unzähligen getrennten Teilchen bestehen, eine innere Ladung erhalten. Die Luft eines Zimmers, in welchem eine Elektrisiermaschine arbeitet, ist geladen. Die Wolken sind gewöhnlich mit mehr oder weniger Elektrizität geladen, welche wahrscheinlich von der an der Erdoberfläche stattfindenden Verdunstung herrührt. Die kleinen Wasserteilchen, welche in der Luft schweben, werden stärker geladen, und da sie infolge der Schwere herabfallen und sich vereinigen, so nimmt die Stärke ihrer Ladungen noch zu. Angenommen 8 kleine Tropfen vereinigten sich zu einem einzigen. Dieser letztere besitzt alsdann die achtfache Elektrizitätsmenge, welche über die Oberfläche einer einzigen Kugel vom doppelten Radius (und deshalb von doppelter Kapazität, nach Art. 267) der ursprünglichen Tropfen verteilt ist; und das elektrische Potential dieser Kugel ist deshalb 4mal grösser. Nun kann eine Wolke aus solchen geladenen Kugeln bestehen und ihr Potential kann sich daher nach und nach durch die Vereinigung der Tropfen erhöhen; und die elektrische Ladung wird an der untern Fläche der Wolke immer stärker, indem die Oberfläche der Erde unterhalb der Wolke als Kondensatorplatte wirkt und durch Influenz mit der ent-

gegengesetzten Art von Elektrizität geladen wird. Wird die Potentialdifferenz so gross, dass die dazwischen befindliche Luftschicht der Spannung nachgiebt, so findet an der Stelle, wo die Luft den geringsten Widerstand bietet, eine Funkenentladung statt. Dieser Funkenblitz, welcher unter Umständen länger als eine Meile ist, entladet nur die Elektrizität, welche sich an der Oberfläche der Wolke angesammelt hat, und die andern Teile der Wolke üben nun auf den entladenen Teil eine rückwirkende Kraft aus, indem sie innere Anziehungen und innere Entladungen veranlassen. Die auf diese Weise eingeleiteten innern Wirkungen erklären das gewöhnliche Aussehen einer Gewitterwolke, welche als scharf begrenzte Wolkenmasse mit plattem Boden auftritt, und am obern Ende in beständiger Bewegung zu kochen oder sich aufzutürmen scheint.

326. Blitz und Donner. Arago unterschied 3 Arten von Blitz: 1) *Den Zickzack-Blitz* oder *»den gezackten Blitz«*, welcher gewöhnlich stattfindet. Die Zickzack-Gestalt rührt wahrscheinlich her entweder von dem Vorhandensein fester Teilchen in der Luft oder von lokaler Elektrisierung an gewissen Stellen, wodurch die gebrochene Bahn diejenige vom geringsten Widerstande wird. 2) *Der Flächenblitz*, bei welchem ganze Flächen auf einmal entzündet werden, ist wahrscheinlich nur der an den Wolken stattfindende Reflex eines Blitzes, der an einer andern Stelle des Himmels auftritt. Denselben erblickt man häufig des Nachts am Horizonte, wenn er von einem Gewitter reflektiert wird, welches zu weit entfernt ist, als dass man seinen Donner noch hören könnte. Derselbe ist unter dem Namen »Wetterleuchten« bekannt. 3) *Kugelblitz*, in der Gestalt von *Feuerkugeln*, welche sich langsam vorwärts bewegen und dann in plötzlicher Explosion bersten. Diese Art ist sehr selten, muss jedoch als wirkliches Phänomen anerkannt werden, obgleich mehrere Berichte hierüber sehr übertrieben sind. Aehnliche Erscheinungen im kleinen Massstabe sind an elektrischen Apparaten (obschon gewöhnlich durch Zufall) gezeigt.

Der Schall des Donners kann je nach dem Blitz ein ver-

schiedener sein. Der Funke erhitzt die Luft bei seinem Durchgange, indem er ringsum plötzliche Expansion und Kompression veranlasst, denen ein ebenso plötzliches Eindringen der Luft in den auf diese Weise erzeugten leeren Raum folgt. Ist der Funke geradlinig und kurz, so hört der Beobachter einen kurzen scharfen Schlag. Ist seine Bahn jedoch lang und nicht geradlinig, so hört er die successiven Schläge einen nach dem andern, mit einem charakteristischen *Gerassel*, und die Echo von andern Wolken *rollen* lange nachher heran. Der Blitzstrahl selbst dauert nie länger als den 100,000. Teil einer Sekunde ist jedoch bisweilen von schwingender Art (vergl. Art. 510).

Der Schaden, welchen ein Blitzstrahl anrichtet, wenn er einen unvollkommenen Leiter trifft, erscheint bisweilen als eine heftige mechanische Zertrümmerung, wie z. B. wenn das Mauerwerk eines Schornsteins oder eines Kirchturms einstürzt, bisweilen als eine Wärmewirkung, wenn Glockendrähte und metallene Gegenstände, welche sich in der Bahn des Blitzes befinden, geschmolzen werden. Die physiologischen Wirkungen plötzlicher Entladungen sind im Art. 250 und 320 besprochen.

Der »Rückschlag«, welchen Leute in der Nähe eines Blitzes empfinden, ist bereits im Art. 29 erklärt.

327. Blitzableiter. Der erste Gedanke, das Eigentum vor der Zerstörung durch Blitz zu schützen, ging von Franklin im Jahre 1749 aus, wo er folgendes veröffentlichte:

Kann die Kenntnis dieser Kraft der Spitzen nicht der Menschheit von Nutzen sein bei der Bewahrung der Häuser, Kirchen, Schiffe etc. vor dem Blitzschlag, indem wir hierdurch darauf hingewiesen werden, auf den höchsten Teilen jener Gebäude aufrecht stehende Eisenstäbe zu errichten, die so scharf wie eine Nadel zugespitzt und, um ihr Rosten zu verhüten, vergoldet sind, und vom untern Ende dieser Stäbe einen Drath an der Aussenseite des Gebäudes entlang zu führen in das Erdreich, oder um eine der Wände eines Schiffes, bis der Draht das Wasser berührt? Würden nicht diese zugespitzten Stäbe aller Wahrscheinlichkeit nach das elektrische Feuer, ehe es nahe ge-

nug ist, um einzuschlagen, aus einer Wolke, ohne dass wir es merken, anziehen und dadurch uns vor jenem plötzlichen und schrecklichen Ungemach bewahren?

Maxwell machte den Vorschlag, die Häuser mit einem Netz von Leitungsdrähten zu überziehen, ohne jeden Hauptkonduktor, indem er dabei von dem Gedanken ausging, dass in diesem Falle das Innere des Gebäudes ebenso wie Faradays hohler Würfel (Art. 34) vor der elektrischen Kraft geschützt sei. In letzter Zeit hat man über Blitzableiter vielfach verschiedene Ansichten vorgebracht. Oliver Lodge behauptet, der Blitz beruhe auf elektrischen Oscillationen (vergl. Art. 510) und sei kein Strom. Wenn dem so ist, so ist der Konduktor von geringstem Widerstande nicht notwendigerweise der beste Blitzableiter. Lodge und auch der Verfasser dieser Vorlesungen empfehlen (aus andern Gründen) als Blitzableiter Eisen, welches sie dem Kupfer vorziehen.

Die folgenden Sätze fassen die neuern Ansichten hierüber zusammen:

1) Alle Teile eines Blitzableiters sollen aus demselben Metall bestehen und möglichst wenig Verbindungsstellen haben, ohne scharfe Biegungen und Ecken.

2) Der Gebrauch des Kupfers zu Blitzableitern ist eine unnütze Ausgabe. Eisen ist viel besser. Bandförmige Leitung ist etwas besser als runde Stäbe, doch eignet sich gewöhnlicher galvanisierter eiserner Telegraphendraht ganz gut.

3) Der Konduktor soll nicht allein an der höchsten Stelle des Gebäudes endigen, sondern nach allen hohen Stellen geführt werden. Es ist unpraktisch, sehr grosse zugespitzte Stäbe aufzustellen, welche noch mehrere Fuss über das Dach hinausragen.

4) Der Konduktor soll nach einer tiefen feuchten Erdschicht geführt werden, ohne Rücksicht auf Gas- oder Wasserröhren.

5) Wenn der Konduktor an einer Stelle einer Gas- oder Wasserröhre nahe kommt, so ist es besser, sie metallisch zu verbinden.

6) Bei gewöhnlichen Gebäuden soll der Konduktor von den Wänden isoliert sein, um eine seitliche Entladung nach

eisernen Oefen oder andern Gegenständen von Metall, welche sich im Hause befinden, möglichst zu verhüten.

7) Alle Metallgegenstände ausserhalb des Hauses, Dachrinnen, eiserne Dachverzierungen und dergl. sollen mit einander und mit der Erde, aber nicht mit dem Blitzableiter verbunden werden.

8) Die billigste Art, ein gewöhnliches Haus zu schützen, besteht darin, gewöhnlichen, galvanisierten eisernen Telegraphendraht an allen Ecken, Dachfirsten und Dachrinnen, sowie über allen Schornsteinen anzubringen und denselben dann an verschiedenen Stellen in die Erde zu führen, bis zu einer feuchten Schicht, und hier überall eine Ladung Steinkohlen zu versenken.

9) Ueber der Oeffnung grosser Schornsteine bringt man zweckmässig eine Schlinge oder einen Bogen des Blitzableiters an, der aus dickem, dauerhaftem Metall besteht.

328. Atmosphärische Elektrizität. Im Jahre 1752 machte Lemonnier die Beobachtung, dass die Atmosphäre sich für gewöhnlich in einem elektrischen Zustande befindet. Cavallo, Beccaria, Ceca und andre machten weitere Entdeckungen auf diesem Gebiete und in jüngster Zeit haben Quetelet und Kelvin aus sorgfältigeren Beobachtungen allgemeinere Schlüsse gezogen. Das Hauptresultat ist, dass die Luft über der Erdoberfläche gewöhnlich positiv elektrisch während guten Wetters ist, wenigstens in bezug auf die Erdoberfläche, da diese beziehungsweise negativ ist. Die sogenannten Messungen der »atmosphärischen Elektrizität« sind in Wirklichkeit Messungen der Potentialdifferenz zwischen einem Punkte der Erdoberfläche und einem bestimmten Punkte oberhalb derselben. In den oberen Regionen der Atmosphäre ist die Luft stark verdünnt, und leitet die Elektrizität wie die verdünnten Gase in den Geisslerschen Röhren (Art. 315). Die untere Luftschicht ist, wenn sie trocken ist, ein Nichtleiter. Von der oberen Luftschicht nimmt man an, dass sie mit + Elektrizität geladen ist, während die Erdoberfläche selbst — geladen ist, indem die dazwischen befindliche dichtere Luftschicht wie das Glas einer Leydener Flasche wirkt und die entgegengesetzten Ladungen getrennt hält. Wenn

wir das elektrische Potential in verschiedenen Punkten innerhalb der Dicke des Glases einer Leydener Flasche messen könnten, so würden wir finden, dass die Werte des Potentials in regelmässiger Aufeinanderfolge von einem + Werte auf der einen Seite in einen — Wert auf der andern Seite übergehen, so dass in der Mitte sich ein Punkt vom Potential Null befindet. Nun giebt die Luft bei schönem Wetter immer + Angaben, und ihr Potential ist um so höher, je höher wir die Messung anstellen. Cavallo fand mehr Elektrizität in der Luft über der Kuppel der St. Pauls-Kirche, als an einer tiefern Stelle des Gebäudes. Kelvin fand, dass auf der Insel Arran bei einem Höhersteigen um einen Fuss das Potential von 23 auf 46 Volt stieg; doch war die Potentialdifferenz bisweilen für denselben Höhenunterschied 8 bis 10mal so gross und änderte sich schnell, sobald der Ostwind mit + oder — Elektrizität geladene Wolkenmassen am Himmel herantrieb. Joule und Kelvin fanden, dass in Aberdeen das Potential um 40 Volt pro Fuss stieg, oder 1,3 Volt für einen Höhenunterschied von 1 cm.

Bei schönem Wetter ist eine — Elektrisierung der Luft äusserst selten. Beccaria beobachtete eine solche in 15 Jahren nur 6mal, und dann bei eintretenden Winden. Bei wechselnder Witterung jedoch und bei Regen ist die Luft öfter — als + und zeigt grosse Schwankungen vom Negativen zum Positiven und umgekehrt, mehrere Male in einer halben Stunde. Ein bestimmter Wechsel in dem elektrischen Zustande ist gewöhnlich von einem Witterungswechsel begleitet. »Hat der Regen aufgehört, sagte Ceca, und dauert ein bedeutender Ueberschuss (+) von Elektrizität an, so ist dies ein Zeichen, dass es mehrere Tage schönes Wetter bleibt.«

329. Methoden der Beobachtung. Die frühern Beobachter begnügten sich damit, an ein Elektroskop (mit Goldblättern oder Markkugeln) einen isolierten zugespitzten Stab zu befestigen, der sich oberhalb des Bodens in die Luft erstreckte, oder einen Drachen steigen zu lassen, oder, wie Becquerel, einen Pfeil in die Luft zu schiessen, der mit einem Elektroskope durch

einen feinen Draht verbunden war, welcher entfernt wurde, bevor der Pfeil zur Erde fiel. Gay Lussac und Biot liessen von einem Luftballon einen Draht herab, und konstatierten eine Potentialdifferenz zwischen den obern und untern Luftschichten. Keine dieser Methoden ist vollkommen ausreichend, denn sie geben nicht das Potential für einen bestimmten einzelnen Punkt. Um die Spitze eines Stabes auf das Potential der umgebenden Luft zu bringen, ist es nötig, dass für kurze Zeit materielle Teilchen von jenem Punkte aus entladen werden, wobei jedes Teilchen bei seiner Lostrennung eine + oder — Ladung mit sich führt, bis die Potentiale zwischen dem Stabe und der Luft in jenem Punkte ausgeglichen sind. Volta that dies mit Hilfe einer kleinen Flamme am Ende eines Versuchsstabes. Kelvin wandte einen »*Wassertropf-Apparat*« an, einen isolierten Wasserbehälter, der mit einer in die Luft führenden Röhre versehen ist, aus welcher Tropfen hervordringen, um die Potentiale gleich zu machen; im Winter gebraucht er eine kleine Rolle von befeuchtetem Löschpapier. Dellmann benutzte eine andere Methode, indem er eine Kugel der Influenz durch die Luft aussetzte, dann isolierte und sie ins Haus brachte, um ihre Ladung zu untersuchen. Peltier benutzte ein ähnliches Mittel, indem er auf dem Erdboden oder in seiner Nähe ein empfindliches Abstossungs-Elektrometer aufstellte, welches mit dem Erdboden verbunden, dann isoliert und hierauf behufs Untersuchung ins Haus geschafft wurde. Dieser Prozess lief in Wirklichkeit darauf hinaus, das Elektrometer *durch Influenz* mit der entgegengesetzten Elektrizität der Luft zu laden. In neuerer Zeit hat man zu Beobachtungen über atmosphärische Elektrizität die genaueren Elektrometer des Sir W. Thomson in Anwendung gebracht, besonders das in Art. 283 beschriebene »Quadrant«-Elektrometer, und ein auf dem Prinzipe der Anziehungsscheibe beruhendes »tragbares« Elektrometer. Durch Anwendung eines *Wassertropf*-Kollektors und eines Kelvin-Elektrometers stellte Everett eine Reihe von Beobachtungen in Neu-Schottland an, und fand

die höchste + Elektrisierung bei Frost und bei trockenem Winde, der die Luft mit Eisteilchen erfüllte.

330. Tägliche Aenderungen. Quetelet fand, dass in Brüssel die täglichen Angaben (bei schönem Wetter) zwei Maxima aufwiesen, welche im Sommer um 8 Uhr morgens und 9 Uhr abends, und im Winter um 10 Uhr morgens und 6 Uhr abends statt hatten, und 2 Minima, welche im Sommer um 3 Uhr nachmittags und um Mitternacht eintraten. Ebenso fand er, dass im Januar die Elektrizität ungefähr 13mal stärker war, als im Juni. Die in Kew angestellten Beobachtungen zeigen ein Maximum um 8 Uhr vormittags im Sommer und um 10 Uhr vormittags im Winter, und ein zweites Minimum um 10 Uhr abends im Sommer und um 7 Uhr abends im Winter. Die Maxima entsprechen genau den Stunden des Temperaturwechsels, die Minima denen der konstanten Temperatur. In Paris findet Mascart nur ein Maximum ganz kurz vor Mitternacht; bei Sonnenaufgang nimmt die Elektrizität ab, bis gegen 3 Uhr nachmittags, wo dieselbe ein Minimum erreicht hat; von da nimmt sie wieder zu bis Einbruch der Nacht.

Unsere Kenntnis über diesen wichtigen Gegenstand ist noch sehr unvollkommen. Wir wissen noch nicht einmal, ob alle Aenderungen in der Elektrisierung der Erde gegenüber der Luft durch Ursachen hervorgerufen werden, welche oberhalb oder unterhalb der Erdoberfläche wirken. Gleichzeitige Beobachtungen an verschiedenen Plätzen und in verschiedenen Höhen sind unbedingt notwendig.

331. Das Nordlicht. In allen nördlichen Gegenden der Erde ist das Nordlicht (Aurora borealis) eine gewöhnliche Erscheinung; innerhalb der Arktischen Region und in ihrer Nähe findet dasselbe fast jede Nacht statt. Aehnliche Lichterscheinungen bemerkt man in den südlichen Polargegenden der Erde, wo man sie *Aurora australis* nennt. In europäischen Breiten beobachtet, hat das Nordlicht gewöhnlich die Form einer Anzahl nicht scharf begrenzter Streifen oder Lichtströme von blasser Färbung (bisweilen mit rot und andern Farben vermischt),

welche entweder fächerförmig vom Horizonte in der Richtung des (magnetischen) Nordens verlaufen, oder eine Art Bogen bilden, welcher sich über jenen Teil des Himmels erstreckt. Dies zeigt im allgemeinen Fig. 163. Häufig lässt sich in den Streifen

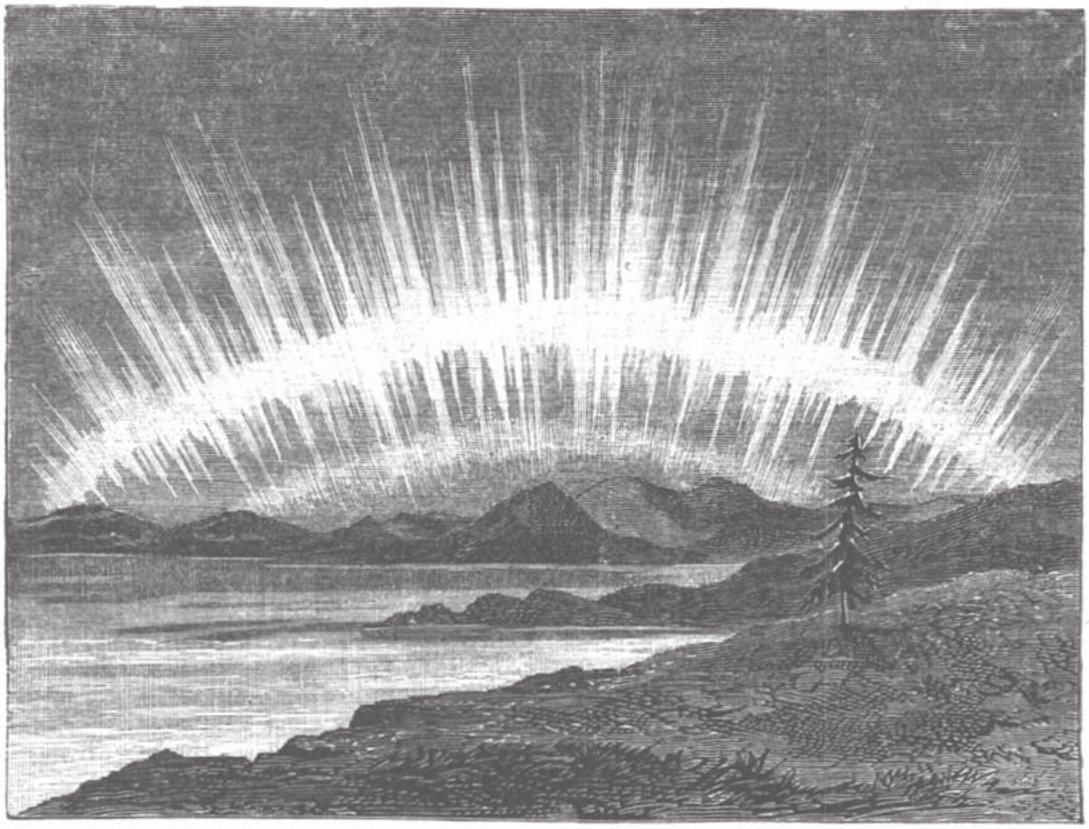


Fig. 163.

eine gewisse flackernde oder strömende Bewegung erkennen. Unter sehr günstigen Umständen dehnt sich das Nordlicht über den ganzen Himmel aus. Das Auftreten eines Nordlichts wird gewöhnlich von einem *magnetischen Sturme* (Art. 154) begleitet, welcher die Kompassnadeln ganzer Regionen des Erdballs affiziert. Dieser Umstand und die Lage der Bögen und Streifen des Nordlichts bezüglich des magnetischen Meridians weisen direkt auf eine elektrische Quelle für dieses Licht hin, — eine Vermutung, welche durch die zahlreichen zwischen Nordlicht und den Erscheinungen der Entladung in verdünnter Luft (Art. 315 und 317) aufgefundenen Analogieen bestätigt wird. Doch wird, wenigstens in unserer Gegend, der elektrische Zustand der untern Schichten der Atmosphäre durch das Auftreten eines Nordlichts

in keiner Weise beeinflusst. Am ersten September 1859 fand ein ungeheurer magnetischer Sturm statt, und Nordlichte sah man fast auf der ganzen Erde; zur selben Zeit fand ein bemerkenswerter Ausbruch von Energie in der Photosphäre der Sonne statt; jedoch konnte man eine gleichzeitige Entwicklung atmosphärischer Elektrizität nicht bemerken. In kürzerer Aufeinanderfolge erscheinen Nordlichte in Perioden von ungefähr $11\frac{1}{9}$ Jahren, was vortrefflich mit den Perioden des Maximums magnetischer Stürme (vergl. Art. 154) und der Sonnenflecke übereinstimmt.

Das Spektroskop zeigt, dass das Nordlicht von gasförmigen Körpern herrührt, da sein Spektrum aus mehreren hellen Linien besteht, welche sich mit Bestimmtheit auf keinen bekannten irdischen Stoff zürückführen lassen, welche jedoch im allgemeinen denjenigen Linien gleichen, welche man im Spektrum der elektrischen Entladung durch verdünnte trockene Luft erblickt.

Die aller Wahrscheinlichkeit nach richtige Theorie des Nordlichts ist diejenige, welche ursprünglich von Franklin herrührt, dass dasselbe nämlich eine Wirkung elektrischer Entladungen in der obern Luftschicht ist, infolge der verschiedenen elektrischen Zustände zwischen der kalten Luft der Polargegenden und den wärmeren Luft- und Dunstströmen, welche in tropischen Gegenden durch die Sonnenwärme vom Niveau des Ozeans aufsteigen.

Nach Nordenskiöld ist der Erdball an den Polen beständig von einem einfachen oder doppelten Lichtringe, resp. einer Lichtkrone, umgeben, welchen er »Nordlicht-Glanz« nennt. Die äussere Kante dieses Ringes schätzt er 120 Meilen über der Erdoberfläche und seinen Durchmesser auf circa 1250 Meilen. Der Mittelpunkt des Nordlicht-Glanzes fällt nicht genau mit dem magnetischen Pole zusammen, und liegt 81° nördlicher Breite und 80° östlicher Länge. Dieser Nordlichtglanz erscheint gewöhnlich als blasser Lichtbogen am Himmel und hat nicht die strahlenförmigen Streifen der Fig. 163, ausgenommen zur Zeit magnetischer Stürme oder solcher, die mit dem Nordlicht zusammenhängen.

Ein künstliches Nordlicht erzeugte Lemström, der auf einem Berge in Lapland ein Netzwerk von Drähten aufstellte, von denen viele Spitzen nach oben ausliefen. Indem er diesen Apparat isolierte und denselben durch einen Telegraphendraht mit einem Galvanometer am Fusse des Berges in Verbindung setzte, war er imstande, wirkliche elektrische Ströme zu beobachten, sobald der Nordlichtschein über dem Berge erschien.

KAPITEL V.

ELEKTROMAGNETISMUS.

XXVI. VORLESUNG: *Magnetisches Potential.*

332. Derjenige Abschnitt der Elektrizitätslehre, welcher von dem Zusammenhange zwischen Magnetismus und elektrischen Strömen handelt, heisst **Elektromagnetismus.** In der 11. Vorl. wurden die Gesetze der magnetischen Kräfte erläutert und die Definition der Poleinheit aufgestellt. Zum Zwecke des Studiums ist es jedoch weit geeigneter, die Wirkung magnetischer und elektromagnetischer Systeme nicht durch die »Kraft«, sondern durch das »*Potential*« auszudrücken, d. h. durch ihre Fähigkeit, Arbeit zu verrichten. In Art. 258 erfuhr der Leser, wie man das elektrische Potential, welches von einer elektrischen Masse herrührt, durch die Arbeit berechnen kann, welche verrichtet wird, wenn eine + elektrische Einheit als Versuchsladung aus unendlicher Entfernung herbeigeschafft wird. **Das magnetische Potential** lässt sich auf ähnliche Weise durch den idealen Vorgang berechnen, einen magnetischen Einheitspol (den nordsuchenden) aus unendlicher Entfernung herbeizuschaffen und den Betrag der hierbei verrichteten Arbeit zu berechnen. Folglich wird eine grosse Anzahl der Beziehungen, welche in der 21. Vorlesung bezüglich des elektrischen Potentials bewiesen wurden, auch für das magnetische Potential richtig sein. Der Leser möge die folgenden Sätze mit den entsprechenden der Art. 258 bis 263 vergleichen:

a) *Das magnetische Potential für einen beliebigen Punkt ist die Arbeit, welche verrichtet werden muss, um einen magnetischen Einheitspol (den nordsuchenden) aus unendlicher Entfernung nach jenem Punkte zu bewegen.*

b) *Das magnetische Potential für einen beliebigen Punkt, welches von einem Systeme von Magnetpolen herrührt, ist die Summe der magnetischen Potentiale, welche von den einzelnen Polen herrühren.*

Der Leser muss sich hier erinnern, dass die Potentiale, welche von nordsuchenden und südsuchenden Polen herrühren, von entgegengesetzten Vorzeichen sind, und dass letztere als negativ zu rechnen sind.

c) *Das magnetische Potential für einen beliebigen Punkt, welches von einem Systeme von Magnetpolen herrührt, lässt sich berechnen* (vergl. Art. 258), *indem man die Stärke der einzelnen Pole durch ihren Abstand von jenem Punkte dividiert und die erhaltenen Werte summiert.* Hat man z. B. die Pole von der Stärke $m' m'' m''' \ldots$ mit den Abständen $r' r'' r''' \ldots$ vom Punkte P, so giebt folgende Gleichung das Potential in P:

$$V_P = \frac{m'}{r'} + \frac{m''}{r''} + \frac{m'''}{r'''} + \ldots\ldots$$

oder $$V_P = \Sigma \frac{m}{r}.$$

d) *Die (magnetische) Potentialdifferenz zwischen 2 Punkten ist die Arbeit, welche an oder von einem (nordsuchenden) Einheitspole verrichtet werden muss, um denselben von einem Punkte nach dem andern zu bewegen.* Werden demnach m Magneteinheiten durch eine Potentialdifferenz V bewegt, so ist die verrichtete Arbeit

$$W = m \,.\, V.$$

e) *Die auf einen Einheitspol ausgeübte magnetische Kraft ist die Aenderung des (magnetischen) Potentials pro Längeneinheit.* Dieselbe ist numerisch gleich der Intensität des Feldes. Da nach Art. 141

$$f = m \,.\, H$$

und da Arbeit gleich dem Produkte aus Kraft und Weg ist,

so folgt, dass $W = f \cdot l = m \cdot H \cdot l$

und da $W = m \cdot V$, so ist

$V = H \cdot l$ oder $H = V : l$

Beispiel. Die magnetische Potentialdifferenz zwischen 2 Punkten, welche einen Abstand von 5 cm haben, längs eines magnetischen Feldes mit 6000 Kraftlinien pro qcm, beträgt 30,000. Folglich würden 30,000 Erg verbraucht werden müssen, um einen Einheitspol von einem Punkte zum andern der magnetischen Kraft entgegen zu bewegen.

f) *Oberflächen gleichen Potentials sind diejenigen (gedachten) Oberflächen, welche einen Magnetpol oder ein System von Polen umgeben, und für deren einzelne Punkte das (magnetische) Potential gleiche Werte hat.* In der Umgebung eines einzigen isolierten Magnetpols z. B. würde das Potential ringsum in gleichen Abständen auch denselben Wert haben; und die Oberflächen gleichen Potentials würden ein System konzentrischer Kugeln sein, deren gegenseitiger Abstand so gross wäre, dass es eines Aufwandes von einem Erg bedürfte, um einen Einheitspol von einem Punkte einer Oberfläche nach einem beliebigen Punkte der nächstfolgenden Oberfläche zu bewegen (vergl. Art. 262). Für jeden wirklichen Magnet mit 2 Polen würden die Oberflächen gleichen Potentials bedeutend komplizierter sein. *Die magnetische Kraft, ob anziehend oder abstossend, wirkt an den Oberflächen gleichen Potentials stets in einer zur Oberfläche senkrechten Richtung; die magnetischen Kraftlinien sind überall senkrecht zu den Oberflächen gleichen Potentials.*

Kraftröhren. Von einem einfachen Magnetpol (welcher weit von allen andern Polen entfernt gedacht wird) gehen die Kraftlinien strahlenförmig nach allen Richtungen. Den benachbarten Raum kann man sich auf diese Weise in eine Anzahl von kegelförmigen Körpern zerlegt denken, welche alle jenen Pol zur gemeinschaftlichen Spitze haben; und durch jeden Kegel gehen wie durch eine Röhre eine bestimmte Anzahl von Kraftlinien. Ein solcher kegelförmiger Körper kann mit »Kraftröhre« bezeichnet werden. Die Gesamtzahl der magnetischen Kraft-

linien innerhalb einer Kraftröhre heisst die *magnetische Kraftflut*[1]). Wo man eine Kraftröhre auch durchschneidet, der Querschnitt geht durch alle eingeschlossenen Kraftlinien hindurch, obgleich dieselben immer mehr divergieren, je weiter die Röhre wird. Folglich;

g) *Die magnetische Kraftflut an einem Querschnitte einer Kraftröhre ist konstant, gleichviel, an welcher Stelle der Querschnitt genommen wird.*

Für den Fall, wo der Magnetismus nicht in einem einzigen Punkte konzentriert, sondern über eine Oberfläche verteilt ist, von welcher die Kanäle ausgehen, haben wir eher von der »Menge des Magnetismus« als von der »Polstärke« zu sprechen, und für diesen Fall hat man:

h) *Magnetische Dichte ist die Menge des Magnetismus pro Flächeneinheit.* Für den Fall einer einfachen magnetischen Schale, über deren Oberfläche der Magnetismus in gleichförmiger Dichte verteilt ist, ist die »Stärke« der Schale gleich der Dicke derselben, multipliziert mit der Oberflächendichte.

333. Intensität des Feldes. Im Art. 115 haben wir gesehen, dass jeder Magnet von einem gewissen »Felde« umgeben ist, innerhalb dessen die magnetische Kraft wahrnehmbar ist. Wir können die Eigenschaften eines Feldes in irgend einem Punkte vollständig angeben, wenn wir die Stärke und die Richtung jener Kraft messen, d. h. wenn wir die **„Intensität des Feldes"** und die Richtung der Kraftlinien bestimmen. *Die »Intensität des Feldes« in einem Punkte wird gemessen durch die Kraft, mit welcher dasselbe auf einen in jenem Punkte befindlichen magnetischen Einheitspol wirkt. Folglich ist Einheit der Intensität des Feldes diejenige, welche auf einen Einheitspol mit der Krafteinheit wirkt.* Man hat also ein Feld von der Intensität 1 in einem Punkte, welcher einen Zentimeter vom Pole eines Magnets von der

---

1) Die magnetische Kraftflut wird bei einigen Schriftstellern die totale Induktion genannt; doch sollte der Ausdruck Induktion nur für die Operation des Induzierens gebraucht werden.

Stärke 1 entfernt ist. Angenommen, es befände sich ein Magnetpol von der Stärke m in einem Felde an einem Punkte, wo die Intensität den Wert H hat, so ist die Kraft m mal so gross, als wenn der Pol von der Stärke 1 wäre, und

$$f = m \times \mathrm{H}.$$

Um die Vorstellung graphisch zu unterstützen, benutzen wir Faraday's Methode, die Eigenschaften eines magnetischen Feldes darzustellen. Wir denken uns Linien so gezogen, dass sie durch ihre Richtung und Dicke die Richtung und Stärke des Feldes darstellen. Dies führt zu der empirischen Regel, ebenso viel magnetische Linien pro Quadratzentimeter (Querschnitt) zu ziehen, als Krafteinheiten am Einheitspole vorhanden sind. Ein Feld von H Einheiten ist ein solches, wo H Dyn am Einheitspole, oder H Linien pro Quadratzentimeter, vorhanden sind. Es folgt, *dass eine magnetische Poleinheit 4π Kraftlinien hat, welche von ihr ausgehen;* denn man hat die Einheit des Feldes in einem Abstande = 1, oder eine Kraftlinie pro Quadratzentimeter; und man hat 4π Quadratzentimeter Oberfläche auf einer Kugel, welche mit dem Radius 1 um den Pol gelegt ist. Ein Magnet, dessen Polstärke m, hat $4\pi m$ Kraftlinien, welche durch den Stahl führen und bei seinem Pole divergieren. Infolge der oben erwähnten Regel wiederholt sich in den elektromagnetischen Formeln der Ausdruck 4π sehr häufig. Denken wir uns einen schmalen Spalt zwischen den Flächen zweier gegenüberstehender Magnete, von denen jeder σ magnetische Einheiten pro Quadratzentimeter Polfläche hat, so ist das Feld in dem dazwischen befindlichen Raume $\mathrm{H} = 4\pi\sigma$.

334. Die Arbeit, welche ein stromführender Konduktor verrichtet, wenn derselbe die Linien eines magnetischen Feldes durchschneidet. Nach der im Art. 258 gegebenen Definition ist die Arbeit, welche verrichtet wird, um Q elektrische Einheiten gegen eine elektromotorische Kraft V zu bewegen, $\mathrm{W} = \mathrm{Q} \cdot \mathrm{V}$. Angenommen, diese elektromotorische Kraft rühre von einem Konduktor her, welcher in der Zeit t N magnetische Linien durchschneide. Ist die Bewegung gleich-

förmig und bezeichnen wir den Durchschnittsstrom während jener Zeit mit C, so ist $Q = C \cdot t$. Die durchschnittliche elektromotorische Kraft ist aber $= \frac{N}{t}$ (vergl. Art. 220). Setzen wir diese Werte ein, so ergiebt sich:

$$W = C \cdot t \cdot \frac{N}{t} = C \cdot N$$

d. h. *die Arbeit, welche verrichtet wird, um einen Strom durch eine magnetische Flut zu bewegen, ist gleich dem Produkte des Stromes und der Gesamtzahl der durchschnittenen magnetischen Linien.* Es ist zu beachten, dass die Arbeit unabhängig von der Zeit ist. Sind C und N in absoluten (C.G.S.) Einheiten gegeben, so wird W durch Erg ausgedrückt.

335. **Die Kraft, welche ein magnetisches Feld auf einen stromführenden Draht ausübt.** Bewegt man einen Draht seitwärts durch die Linien eines magnetischen Feldes um die Länge x, so beschreibt derselbe eine Fläche $l \cdot x$, wo l die Länge des Drahtes bedeutet. Ist H die Anzahl der magnetischen Linien pro Quadratzentimeter, so ist demnach die Gesamtzahl der durchschnittenen Linien $= H \cdot lx$ und die Arbeit $= C \cdot H \cdot lx$, wenn der Draht den Strom C führt. Wird aber die Arbeit W verrichtet, wenn man den Draht um die Länge x fortbewegt, so ist die ausgeübte Kraft $f = \frac{W}{x}$. Folglich ist die auf den Draht ausgeübte Kraft

$$f = C \cdot H \cdot l$$

d. h. *die Kraft ist dem Strome, der Intensität des Feldes, und der Drahtlänge innerhalb des Feldes proportional.*

Diese Kraft hat das Bestreben, den Draht seitlich zu ziehen, da sie rechtwinklig zum Drahte und zu den Linien des Feldes wirkt.

Diese Wirkung ist natürlich eine Folge von Spannungen, welche in dem Medium stattfinden, und verdient eine genauere Betrachtung. Man untersuche das magnetische Feld zwischen einem grossen *N*-Pole und einem ebensolchen *S*-Pole. Die Linien gehen fast gleichmässig und gerade von dem einen zum andern.

In Fig. 164 sieht man den Draht im Querschnitt, mit einem Strome, der zum Beobachter fliesst. Die Folge ist, dass sich das magnetische Feld des Stromes (vergl. Art. 197) über das des Magnets schiebt und dieses stört, so wie es die Figur zeigt. In einem solchen Felde wirken die Spannungen derart, als ob die magnetischen Linien sich zu verkürzen streben, und haben zur Folge, dass der Draht in der verzeichneten Richtung mechanisch gepresst wird. Diese mechanische Kraft wirkt auf den Draht, obgleich sie eine Folge des Stromes ist.

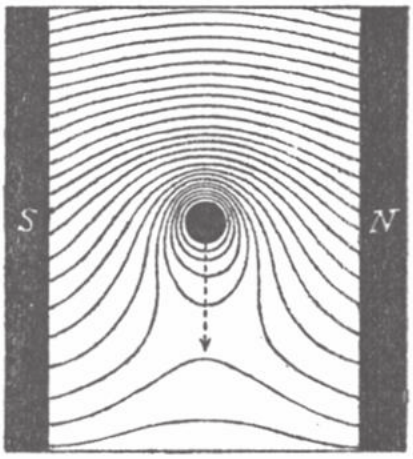


Fig. 164.

Rechnet man nach der oben gegebenen Formel, muss man durch 10 dividieren, falls C in Ampère gegeben ist.

336. Magnetomotorische Kraft (oder totale magnetisierende Kraft) eines in einem spiralförmigen Konduktor fliessenden Stromes. Ein Konduktor, der einen Strom von C Ampère führt, möge zu einer Spirale von S Windungen aufgerollt sein. Man sieht leicht ein, dass die totale magnetisierende Kraft eines solchen Konduktors der Zahl der Ampère-Windungen proportional ist; denn der Versuch zeigt, dass beispielsweise ein Strom von 10 Ampère, der in einer Rolle von 50 Windungen fliesst, dieselbe magnetische Kraft besitzt, wie ein Strom von 5 Ampère in 100 Windungen oder wie ein Strom von 1 Ampère in 500 Windungen. Jeder derselben hat 500 Ampère-Windungen.

Berechnen wir dann die Arbeit, welche verrichtet würde, um einen magnetischen Einheitspol von einem Punkte P längs einer geschlossenen Bahn (Fig. 165) nach dort zurück zu bewegen, entgegen den magnetischen Kräften des Systems, wobei wir annehmen, dass die Bahn durch sämtliche Windungen der magnetisierenden Rolle hindurchgeht. Diese Arbeit

Fig. 165.

ist ein Mass der *magnetisierenden Kraft dieses Systems* oder mit andern Worten, ein Mass seiner **magnetomotorischen Kraft.** Eine solche geschlossene Bahn kann je nach Umständen ganz in der Luft liegen, oder teils in der Luft, teils in Eisen, oder ganz in Eisen. Der Beweis ist gänzlich unabhängig von irgend welchem Körper, der sich in der gedachten Bahn befindet.

Nun wollen wir uns diesen Einheitspol mit seinen 4π strahlenförmigen magnetischen Linien von P durch die Windungen längs der geschlossenen Bahn nach dort zurück bewegt denken. Jede Windung der Rolle schneidet dabei jede magnetische Linie einmal, und demnach ist nach Art. 333 und 334 die totale verrichtete Arbeit

$$W = \frac{4\pi . C . S}{10},$$

wo wir durch 10 dividieren, um die Ampère auf C.G.S. Einheiten zu reduzieren. Da nun $4\pi = 12{,}57$ ist, so ergiebt sich hieraus die Regel: *Die magnetomotorische Kraft*[1]) *einer Rolle ist gleich dem 1,257fachen der Ampère-Windungen.*

337 Intensität eines Feldes in einer langen, röhrenförmigen Rolle (Solenoid). Eine spiralförmig gewundene Drahtrolle heisst ein *Solenoid.* Dieselbe hat, falls sie von einem Strome durchflossen wird, in ihrem Innern ein magnetisches Feld und ist in der That ein Magnet ohne Eisen, solange der Strom fliesst. Dieses magnetische Feld ist im ganzen Innern der Röhre sehr gleichförmig, vorausgesetzt, das die Spirale sehr lang ist, etwa 20mal so lang wie der Durchmesser der Spirale. Nur an den Enden der Rolle wird dasselbe schwächer. Um die Intensität H des Feldes zu bestimmen, erinnern wir uns (Art. 332 e), dass die Arbeit, welche an einem Einheitspole verrichtet wird, um denselben um eine Länge l im Felde H fortzubewegen, gleich H.l ist. Aber die Arbeit, welche verrichtet wird, wenn

1) Da diese magnetomotorische Kraft sich aus einer Anzahl kleiner Elemente zusammensetzt, welche längs der Bahn beliebig verteilt sind, so wird jene bisweilen das Linien-Integral der magnetisierenden Kräfte genannt.

derselbe längs des Solenoids von der Länge l bewegt wird, ist in Wirklichkeit gleich derjenigen, welche längs der geschlossenen Bahn geleistet wird, weil nahezu sämtliche Kräfte auf der Seite der innern Bahn geschnitten werden. Daher ist

$$\frac{4\pi C.S}{10} = H.l, \text{ oder } H = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{C.S}{l}$$

d. h. *die Intensität des Feldes in einer langen Spirale ist gleich dem 1,257fachen der Anzahl der Ampère-Windungen pro Zentimeter Länge.*

Am Ende einer langen Spirale ist die Intensität des Feldes gerade halb so gross wie in der Mitte.

338. Magnetisches Feld, welches von einem unendlich langen, geraden Stromleiter herrührt. Gesetz vom umgekehrten Verhältnis des einfachen Abstandes. Im Punkte P (Fig. 166) befinde sich ein Einheitspol im Abstande r von einem unendlich langen, geraden Stromleiter, welcher einen Strom von C Ampère führen möge. Die Kraft, welche den Pol um den Draht zirkulieren lässt, kann man auf folgende sehr einfache Weise berechnen. Würde der Einheitspol sich einmal um den Draht längs einer kreisförmigen Bahn vom Radius r bewegen, so würde jede der 4π magnetischen Linien, welche von ihm ausgehen, von dem Drahte einmal durchschnitten werden. Folglich würde nach Art. 334 die bei einer einmaligen Umdrehung verrichtete Arbeit gleich $\frac{4\pi C}{10}$ sein. Diese Arbeit wurde jedoch geleistet, indem der Einheitspol, den Kräften des Systems entgegen, längs einer Bahn von der Länge $2\pi r$ fortbewegt wurde, folglich ist

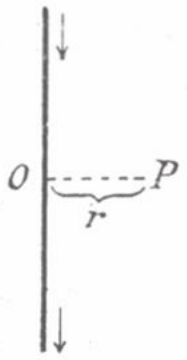


Fig. 166.

$$W = f.2\pi r = \frac{4\pi.C}{10}, \text{ oder}$$

$$f = \frac{2C}{10r}.$$

Hieraus geht hervor, dass die auf einen Einheitspol ausgeübte Kraft und daher auch die Intensität des Feldes *dem Strome*

direkt und dem Abstande vom Drahte umgekehrt proportional ist.

Beispiel. Die Kraft, welche auf einen Pol von 1200 magnetischen Einheiten ausgeübt wird, in einem Abstande von 4 cm von einem langen, geraden Drahte, der einen Strom von 60 Ampère führt, beträgt 3600 Dyn oder 3,52 g.

Die Thatsache, dass die Kraft dem einfachen Abstande (und nicht dem Quadrate desselben) umgekehrt proportional ist, wurde von Biot und Savart im Jahre 1820 experimentell entdeckt.

Rings um einen derartigen geraden Stromleiter besteht das magnetische Feld aus einem cylindrischen Wirbel von kreisförmigen Linien (vergl. Art. 197), deren Dichte in demselben Verhältnis abnimmt, wie ihr Radius zunimmt. Ausserhalb eines geraden Drahtes, der einen Strom von 10 Ampère führt, sind die Werte von H folgende: 2 bei 1 cm; 1 bei 2 cm; 0,4 bei 5 cm u. s. w. Der Pol hat das Bestreben, sich kreisförmig um den Draht zu bewegen.

339. Gegenseitige Wirkung eines Magnetpols und eines Stromelements. Ein Stromelement ist ein unendlich kleines Stück eines von einem Strome durchflossenen Drahtes. Bezeichnet man seine Länge mit dl und den Strom mit C, so ist Cdl der magnetische Wert des Elements in Bezug auf alle Punkte in seiner Aequator-Ebene. Angenommen, das Element habe den Abstand r (Fig. 167) von einem Magnetpole von m Einheiten und sei rechtwinklig zu ihrer Verbindungslinie gestellt. Da das Element im Vergleich zu r sehr klein ist, so lässt sich das Gesetz der umgekehrten Quadrate anwenden, folglich ist die gegenseitige Wirkung:

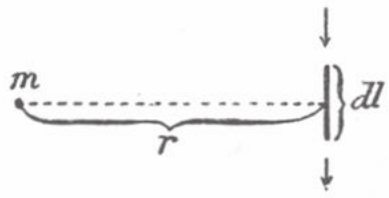


Fig. 167.

$$f = \frac{m \cdot Cdl}{10 \cdot r^2}.$$

Diese Kraft ist weder anziehend noch abstossend, sondern rechtwinklig zum Element und der Linie, welche dasselbe mit m verbindet.

340. Magnetisches Feld, welches von einem kreisförmigen Stromleiter herrührt. Um die Wirkung zu bestimmen, welche ein kreisförmiger Stromleiter auf einen Punkt seiner Achse ausübt (Fig. 168), nehmen wir an, dass sich im Punkte P, der vom Zentrum den Abstand x haben möge, ein Einheitspol befinde. Dann wird nur ein Teil der 4π Linien, welche von ihm ausgehen, durch den Kreis gehen, und zwar wird die Zahl dieser Linien dem körperlichen Winkel proportional sein, welchen der Kreis in P spannt, nämlich gleich $2\pi\,(1-\cos\theta)$, wo θ der Winkel zwischen der Achse und dem schiefen Abstande a ist. Wenn wir daher den Pol aus unendlicher Entfernung bis zu diesem Punkte bewegen, so ist die Arbeit, welche dadurch geleistet wird, dass diese Linien den stromführenden Draht durchschneiden, nach Art. 334:

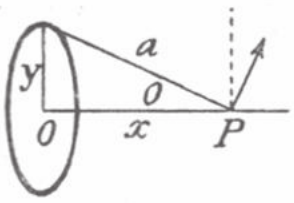


Fig. 168.

$$W = \frac{2\pi C\,(1-\cos\theta)}{10},$$

wo C die Anzahl der Ampère des Stromes bedeutet. Dieser Ausdruck giebt die gegenseitige Energie zwischen Pol und Strom. Um die Kraft im Punkte P zu berechnen, müssen wir nach x differentiieren und finden das Verhältnis, in welchem die gegenseitige Energie pro Längeneinheit abnimmt. Hierbei ist es vorteilhaft, für $\cos\theta$ seinen Wert $x : (x^2+y^2)^{\frac{1}{2}}$ zu substituieren. Wir erhalten dann

$$f = \frac{dW}{dx} = \frac{2}{10}\,\pi C \cdot \frac{y^2}{(x^2+y^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{2}{10} \cdot \pi \cdot C \cdot \frac{y^2}{a^3}$$

da $(x^2+y^2)^{\frac{3}{2}} = a^3$ ist. Es ergiebt sich hieraus der Satz: die magnetische Kraft in einem auf der Achse befindlichen Punkte P ist dem Strome proportional, und *dem Kubus des schiefen Abstandes umgekehrt proportional.* (Vergl. den Fall eines Stabmagnets, Art. 138).

Eine andere Methode, diesen Satz zu beweisen, besteht in folgendem. Indem wir von dem in Art. 339 gefundenen Aus-

druck für die Wirkung eines Stromelements ausgehen, und die des obersten Elements des Kreises betrachten, dessen schiefer Abstand $a = \sqrt{x^2 + y^2}$ ist, ergiebt sich, dass die unendliche kleine Kraft *df*, welche das Stromelement C*dl* auf den Einheitspol im Punkte *P* ausübt, rechtwinklig zu *a* und zu *dl* (in der Richtung des Pfeiles) ist, und $= \frac{C \cdot dl}{10\, a^2}$ ist. (Vergl. Art. 201).

Da alle Elemente *dl* symmetrisch zur Achse liegen, müssen wir ihre schief wirkenden Kräfte in zwei Teile zerlegen: in einen Teil, welcher rechtwinklig zur Achse wirkt, und welcher verschwindet, da sich die einzeln Komponenten paarweise aufheben, und in einen Teil, welcher in der Richtung der Achse wirkt, und dieser ist für jedes Element gleich dem obigen Ausdrucke, multipliziert mit $\sin \Theta$, so dass die in der Richtung der Achse genommene Kraft, welche von jedem Elemente von der Länge *dl* herrührt, den Wert hat:

$$\mathrm{df} = \frac{C \cdot dl \cdot \sin \Theta}{10\, a^2}$$

oder, da $\sin \Theta = \frac{y}{a}$,

$$\mathrm{df} = \frac{C \cdot dl \cdot y}{10\, a^3}.$$

Nun ist aber die totale Kraft, welche von allen Elementen herrührt, gleich dem Integrale aus der Summe ihrer Längen, und dieses Integral hat, rings um den Kreis genommen, den Wert: $\int dl = 2\pi y$. Folglich haben wir

$$\mathrm{f} = \frac{2\pi \cdot C \cdot y^2}{10\, a^3}.$$

Wird *P* bis zum Zentrum des Kreises fortbewegt, so wird $a = y$ und wir kommen dann auf die Formel des Tangentengalvanometers zurück: $\mathrm{f} = \frac{2\pi C}{10\, r}$ (vergl. Art. 207).

Auch haben wir zu beachten, dass bei sehr grossen Abständen des *P* vom Zentrum die Grösse *a* annähernd $= x$ wird,

und dass die Kraft dem Kubus der Axial-Entfernung umgekehrt proportional ist.

Hierdurch erhalten wir ein Mittel, die Empfindlichkeit eines Tangentengalvanometers zu regulieren, indem wir die Nadel mit ihrer Skala so anbringen, dass sie längs der Achse der Rolle einen Ausschlag macht. Im Punkte P, für welchen $a = 2y$ ist, beträgt die von der Rolle auf die Nadel ausgeübte Kraft nur noch $\frac{1}{8}$ der Kraft, welche im Zentrum stattfindet.

341. Moment einer kreisförmigen Rolle. Eine kreisförmige Rolle, welche einen Strom führt, wirkt wie ein Magnet, dessen Achse mit der Achse der Rolle zusammenfällt. Ihr magnetisches Moment (Art. 135) ist das Produkt aus dem Strome (in absoluten Einheiten) und der eingeschlossenen Fläche, oder, wenn C den Strom in Ampère bedeutet, und A die Gesamtfläche aller Windungen, so ist das Moment $= \frac{A \cdot C}{10}$. Wird eine solche Rolle in ein Feld von der Intensität H gebracht, so ist sie bestrebt, sich derart zu stellen, dass ihre Achse längs der Richtung des Feldes liegt. Ist Θ der Winkel zwischen jenen Richtungen, so ist das Drehungsmoment $= \frac{A \cdot C \cdot H \cdot \sin \Theta}{10}$.

342. Das Potential, welches von einem (Solenoid-) Magnet herrührt. Ein langer dünner, gleichförmig magnetisierter Magnet zeigt nur an den beiden Enden freien Magnetismus und wirkt auf äussere Gegenstände genau so, als wenn 2 gleiche magnetische Mengen entgegengesetzter Art in jenen beiden Punkten angesammelt wären. Ein solcher Magnet wird bisweilen ein *Solenoid* genannt. Das magnetische Potential, welches von einem Solenoid herrührt, und alle seine magnetischen Wirkungen hängen allein von der Lage seiner beiden Pole und von der Stärke derselben ab, nicht von der Gestalt des zwischen ihnen befindlichen Stabes, möge dieser gerade oder gekrümmt sein. In Art. 332 c wurde die Regel angegeben, wie man das von einem Systeme von Polen herrührende Potential findet. Angenommen, die beiden Pole eines Solenoids wären

von der Stärke $+m$ und $-m$ und die resp. Abstände dieser Pole von einem äussern Punkte P seien r_1 und r_2, dann ist das Potential im Punkte P:

$$V_P = m\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right).$$

Angenommen, ein Magnet wäre so gebogen, dass seine beiden Pole einander berührten: dann wirkt derselbe auf einen äussern Gegenstand nicht als Magnet, und hat auch kein »Feld«; denn wenn die beiden Pole sich berühren, so sind ihre Abstände r_1 und r_2 von einem äussern Punkte P einander gleich und es ist

$$\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} = 0.$$

343. Das Potential, welches von einer magnetischen Schale herrührt. Gauss wies nach, *dass das von einer magnetischen Schale herrührende Potential in einem Punkte ihrer Nachbarschaft gleich ist der Stärke der Schale, multipliziert mit dem körperlichen Winkel, welchen der Punkt mit der Schale bildet;* wobei die Stärke einer magnetischen Schale das Produkt ihrer Dicke und ihrer magnetischen Oberflächen-Dichte ist.

Bedeutet w den körperlichen Winkel, welchen der Punkt P mit der Schale bildet, und i die Stärke der Schale, so ist:

$$V_P = w \,.\, i.$$

Beweis. Um diesen Satz zu beweisen, würde eine einfache Anwendung der Integralrechnung erforderlich sein. Doch muss an dieser Stelle folgender, allerdings unvollständiger, geometrischer Beweis genügen. Man denke sich die Schale in eine Anzahl kleiner Elemente von der Dicke t und der Grundfläche s zerlegt (Fig. 169). Der ganze körperliche Winkel, welchen der Punkt P mit der Schale bildet, möge ebenfalls in eine Anzahl kleiner Elementarkegel zerlegt werden, jeder mit dem körperlichen Winkel w'; r_1 und r_2 mögen die Abstände der beiden Oberflächen des Elements von P bedeuten. Durch den kleinen Kegel lege man senkrecht zu r_1 eine Ebene,

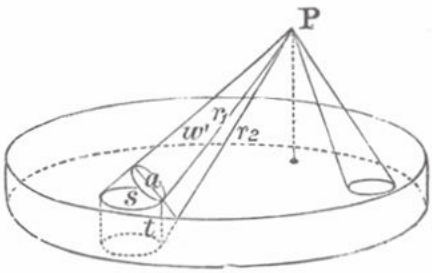


Fig. 169.

und bezeichne mit a die Fläche des Querschnitts; der Winkel zwischen den Flächen s und a möge mit β bezeichnet werden, dann ist: $s = \frac{a}{\cos\beta}$. Ferner sei i die »Stärke« der Schale (d. h. ihre magnetische Oberflächendichte multipliziert mit ihrer Dicke), so ist $\frac{i}{t}$ die magnetische Oberflächendichte, und $s.\frac{i}{t} = m$ die Polstärke des kleinen Magnets. Nun ist der körperliche Winkel

$$w' = \frac{\text{Fläche seines orthogonalen Querschnitts}}{r^2} = \frac{a}{r^2}$$

folglich $a = w'r^2$ und $s = \frac{w'r^2}{\cos\beta}$,

folglich $w'i\,\frac{r^2}{t\cos\beta} = m.$

Nun ist aber für den Punkt P das Potential des Magnets mit dem Pole m

$$v = m\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

$$= w'i\,\frac{r^2}{t\cos\beta}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

und $\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} = \frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2}$, wofür wir auch $\frac{r_2 - r_1}{r^2}$ schreiben können, da wir den Unterschied zwischen r_1 und r_2 so klein machen können, wie wir wollen. Da ferner $r_2 - r_1 = t\cos\beta$, so hat man:

$$v = w'i\,\frac{r^2}{t\cos\beta}\,.\,\frac{t\cos\beta}{r^2} = w'\,.\,i$$

d. h. das Potential, welches von einem Elemente der Schale herrührt, ist gleich der Stärke der Schale, multipliziert mit dem körperlichen Winkel, welchen der Punkt P mit dem Elemente bildet. Bezeichnet daher V die Summe aller Werte von v für alle Elemente, und w den ganzen körperlichen Winkel (die Summe aller kleinen körperlichen Winkel w'), so ist

$$V_P = w\,.\,i$$

d. h. für jeden Punkt ist das Potential, welches von einer mag-

netischen Schale herrührt, gleich der Stärke der Schale, multipliziert mit dem körperlichen Winkel, welchen jener Punkt mit der ganzen Schale bildet.

Daher stellt wi die Arbeit dar, welche von oder an einem Einheitspole verrichtet werden müsste, um denselben aus unendlicher Entfernung nach dem Punkte P zu bewegen, mit welchem die Schale den körperlichen Winkel w bildet. Im Punkte Q, für welchen der Winkel der Schale einen andern Wert hat, würde das Potential ebenfalls einen andern Wert haben, so dass die Potentialdifferenz zwischen P und Q

$$V_Q - V_P = i\,(w_Q - w_P)$$

wäre. Würde ein Magnetpol von der Stärke m nach P bewegt, so würde die Arbeit m mal zu verrichten sein, oder das gemeinschaftliche Potential würde $= m \,.\, w \,.\, i$ sein.

344. Potential eines Magnetpols auf eine Schale. Wenn die Schale von der Stärke i an die Stelle geschafft werden soll, wo sie mit dem Pole m einen körperlichen Winkel w bildet, so erfordert dies offenbar denselben Aufwand an Arbeit, als wenn der Magnetpol aus unendlicher Entfernung heranbewegt werden soll; folglich stellt $m \,.\, w \,.\, i$ sowohl das Potential des Poles auf die Schale dar, als auch das Potential der Schale auf den Pol. Nun können die von einem Pole ausgehenden Kraftlinien ihrer Zahl nach der Stärke dieses Poles proportional gesetzt werden, und von einem einfachen Pole würden sie strahlenförmig nach allen Richtungen auslaufen. Wenn wir daher im Punkte P, dem Scheitel des körperlichen Winkels eines Kegels, einen Magnetpol hätten, so würde die Zahl der Kraftlinien, welche innerhalb des körperlichen Winkels lägen, diesem proportional sein. Daher ist es zweckmässig, $m \,.\, w$ als Ausdruck für die Zahl der Kraftlinien des Poles zu nehmen, welche durch die Schale führen, und wir können die auf diese Weise begrenzte Zahl mit N bezeichnen. Mithin der Satz: *Das Potential eines Magnetpols auf eine magnetische Schale ist gleich der Stärke der Schale, multipliziert mit der Anzahl der (von dem Magnetpole herrührenden) Kraftlinien, welche durch die Schale führen,*

oder $V = N . i$. Würde die Schale oder der Pol nach einem Punkte bewegt, wo eine andere Zahl von Kraftlinien geschnitten würden, so würde die Potentialdifferenz zwischen den beiden Punkten dargestellt durch

$$V_Q - V_P = \pm i\,(N_Q - N_P).$$

Um einen nordsuchenden (oder positiven) Pol der abstossenden Kraft der nordsuchenden Fläche einer Schale entgegen zu bewegen, ist ein + Betrag von zu verrichtender Arbeit erforderlich; und ihre gegenseitige Wirkung würde es möglich machen, dass nachher kraft ihrer Lage Arbeit verrichtet würde; in diesem Falle ist dann das Potential positiv. Um dagegen einen nordsuchenden Pol der südsuchenden Fläche einer Schale entgegen zu bewegen, muss der Pol Arbeit verrichten, denn dieser wird angezogen; und da die vom Pole verrichtete Arbeit so aufgefasst werden kann, als ob wir eine *negative* Arbeit verrichteten, so hat das Potential hier einen negativen Wert.

Nehmen wir ferner an, wir könnten einen nordsuchenden Einheitspol der abstossenden Kraft der nordsuchenden Fläche einer Schale von der Stärke i entgegen bewegen bis ganz auf die Fläche der Schale, dann würde die Schale die Hälfte des ganzen Raumes um den Pol herum einnehmen, und der körperliche Winkel zwischen Schale und Pol betrüge also 2π, das Potential also $+ 2\pi . i$. Hätten wir die südsuchende Fläche genommen, so hätte das Potential an dieser Fläche den Wert $- 2\pi i$ gehabt. Daraus geht hervor, *dass das Potential sich um die Grösse $4\pi i$ ändert, wenn man von einer Seite der Schale zur andern übergeht.* Zwischen einem Pole und einer Schale findet eine ähnliche Einwirkung statt wie zwischen zwei Polen (Art. 121). Wenn ein nordsuchender Pol der nordsuchenden Fläche einer Schale genähert wird, so führen keine Kraftlinien des Magnets durch die Schale, dieselben gehen vielmehr seitwärts (vergl. Fig. 71) wogegen in dem Falle, wo ein nordsuchender Pol der südsuchenden Fläche einer Schale genähert wird, eine grosse Anzahl der Linien die Schale treffen, und der Pol thatsächlich von der Schale angezogen wird, wo dann möglichst viele Kraft-

linien von der Schale geschnitten werden. Diese Wirkung können wir in Worten so ausdrücken: *Eine magnetische Schale und ein Magnetpol wirken gegenseitig auf einander und nehmen eine solche Lage an, dass die Zahl der von der Schale geschnittenen Kraftlinien ein Maximum wird* (Maxwell's Regel, Art. 199). Ausserhalb der anziehenden Fläche der Schale ist das Potential $-wi$, und der Pol bewegt sich so, dass diese negative Grösse möglichst gross, das Potential also ein Minimum wird. Dies ist nur eine andere Ausdrucksweise für den besonderen Fall des allgemeinen Satzes, dass Körper sich so zu bewegen streben, dass die Energie, welche sie kraft ihrer Lage besitzen, zu einem Minimum herabsinkt.

345. Magnetisches Potential, welches von einem Strome herrührt. Die magnetische Schalen betreffenden Sätze, welche in den vorhergehenden Paragraphen angegeben sind, sind aus dem im Art. 198 angeführten Grunde so wichtig, dass nämlich ein Schliessungsbogen, der von einem elektrischen Strome durchflossen wird, sich wie eine magnetische Schale verhält. Indem wir die elektromagnetische Einheit der Stromstärke zu Grunde legen (Art. 348), können wir sogleich auf Art. 342 zurückgreifen und die Sätze über magnetische Schalen auf geschlossene Volta'sche Schliessungsbögen übertragen.

a) **Potential eines geschlossenen Stromkreises** (vgl. Art. 343).

Das Potential V eines geschlossenen Volta'schen Stromkreises in bezug auf einen benachbarten Punkt ist gleich der Stromstärke, multipliziert mit dem körperlichen Winkel w, welchen der Punkt mit dem Stromkreise bildet. Ist C die Stromstärke in elektromagnetischen Einheiten, so ist

$$V_P = - w \,.\, C.$$

b) In einem Punkte Q, wo der körperliche Winkel des Schliessungsbogens den Wert w_Q statt w_P hat, hat auch das Potential einen andern Wert und die Potentialdifferenz ist

$$V_Q - V_P = - C\,(w_Q - w_P).$$

c) **Potential zwischen einem Magnetpol und einem**

Stromkreise. Würde man einen Magnetpol von der Stärke m bis nach einem Punkte P bewegen, so wäre m mal so viel Arbeit verrichtet, als wenn der Magnetpol von der Stärke 1 gewesen wäre, und die Arbeit würde die nämliche sein, ob der Pol m nach dem Stromkreise oder der Stromkreis nach dem Pole hin bewegt würde. Folglich ist ihr Potential

$$-m \,.\, w\,\mathrm{C}.$$

Da wir jedoch, wie in Art. 344, $m \,.\, w$ als die Anzahl der Kraftlinien des Poles ansehen können, welche vom Stromkreise geschnitten werden und durch denselben hindurchgehen, so können wir für jene Zahl N setzen und schreiben

$$\mathrm{V} = -\,\mathrm{C} \,.\, \mathrm{N}$$

oder *das Potential zwischen einem Magnetpole und einem Stromkreise ist gleich der Stromstärke, multipliziert mit der Anzahl der Kraftlinien des Magnetpols, welche vom Stromkreise geschnitten werden.* (Das Ganze mit negativem Zeichen genommen.)

d) Wie für den Fall der magnetischen Schale, so ändert sich auch beim Stromkreise der Wert des Potentials um $4\pi\mathrm{C}$, wenn man von einem Punkte auf der einen Seite desselben zu einem Punkte auf der andern Seite übergeht; d. h. auf der einen Seite ist das Potential $-2\pi\mathrm{C}$ und auf der andern $+2\pi\mathrm{C}$, folglich muss eine Arbeit $= 4\pi\mathrm{C}$ verrichtet werden, um einen Einheitspol von der einen Seite auf die entgegengesetzte um die Aussenseite des Stromkreises herum zu bewegen. Die Arbeit, welche verrichtet wird, wenn man den Schliessungsdraht in n Windungen schlingt, würde $4n\pi\mathrm{C}$ betragen.

346. e) Potential zweier Ströme auf einander. Zwei geschlossene Ströme haben ein Potential, welches von ihrer Stärke, ihrem gegenseitigen Abstande, von ihrer Form und ihrer Lage abhängt. Sind die Stromstärken C und C', der Abstand zwischen zwei Elementen ds und ds' der Leitungsdrähte r und ε der Winkel, welchen die Elemente mit einander bilden, so lässt sich nachweisen, dass ihr Potential $= -\,\mathrm{CC}' \iint \frac{\cos\varepsilon}{r}\, ds\, ds'$. Dieser Ausdruck stellt die Arbeit dar,

welche verrichtet werden müsste, um einen der beiden Stromkreise aus unendlicher Entfernung in die betreffende Lage in der Nähe des andern zu bewegen, und ist eine negative Grösse, wenn sie sich anziehen. Nehmen wir nun an, die Stromstärke wäre in jedem Schliessungsdrahte gleich der Einheit, so ist ihr Potential in diesem Falle $\int\int \frac{\cos \varepsilon}{r} \, ds \, ds'$, eine Grösse, welche nur von der geometrischen Gestalt und Lage der Schliessungsdrähte abhängt, und welche wir mit dem Symbole M bezeichnen wollen, dem »*Koeffizienten des Potentials*«. Wir können dann das Potential beider Ströme C und C' ausdrücken durch — CC' M.

Nun haben wir aber in dem Falle eines einzigen Stromes gesehen, dass wir das Potential zwischen einem Strome und einem Einheitspole darstellen können als das Produkt der Stromstärke — C, multipliziert mit der Anzahl N der Kraftlinien des Magnetpols, welche von dem Strome geschnitten werden. Daher muss das Symbol M die Anzahl der beiderseitigen Kraftlinien bedeuten, welche von beiden Strömen geschnitten werden, falls die Ströme von der Stärke 1 wären. Nennen wir die beiden Ströme A und B, und sind dieselben von der Stärke 1, so schneidet A M Kraftlinien von B und B schneidet M Kraftlinien von A.

Nehmen wir nun ferner an, dass beide Ströme in derselben Richtung (in der des Uhrzeigers) fliessen; die Vorderseite oder südsuchende Fläche des einen Stromes befindet sich dann der Rückseite oder nordsuchenden Fläche des andern Stromes gegenüber, dieselben ziehen sich also an und verrichten thatsächlich Arbeit, indem sie sich einander nähern, oder (wie das negative Vorzeichen zeigt), es wird eine negative Arbeit verrichtet, indem der eine Strom dem andern genähert wird. Haben sie sich so weit wie möglich angezogen, so fallen die Schliessungsdrähte der Richtung und Lage nach, so viel wie überhaupt möglich, zusammen. Ihre potentielle Energie hat ihr tiefstes Minimum erreicht, indem ihr Potential ein negatives Maximum ist und ihr Potentialkoeffizient M seinen grösstmög-

lichen Wert hat. *Zwei Ströme stellen sich daher so, dass ihr Potentialkoeffizient M den grösstmöglichen Wert erhält.* Dies rechtfertigt Maxwell's Regel (Art. 199), da M die Anzahl der Kraftlinien bedeutet, welche von beiden Strömen geschnitten werden. Und da in dieser Lage jeder Strom möglichst viele magnetische Kraftlinien durch den andern induziert, so wird der *Potentialkoeffizient* auch *Induktionskoeffizient* genannt. (Art. 449.)

XXVII. VORLESUNG: *Die elektromagnetischen Einheiten.*

347. Magnetische Einheiten. Alle magnetischen Grössen, Polstärke, Intensität der Magnetisierung etc. werden mit Hilfe besonderer Einheiten ausgedrückt, welche aus den Fundamentaleinheiten der Länge, der Masse und der Zeit abgeleitet werden. Diese letzteren sind in der Anmerkung über fundamentale und abgeleitete Einheiten erklärt (Art. 275). Die meisten der folgenden Einheiten wurden unmittelbar in der vorhergehenden oder in der 11. Vorlesung erklärt; aus ihnen folgen die übrigen.

Einheitsstärke des Magnetpols. Der magnetische Einheitspol ist derjenige, welcher einen gleichnamigen Pol von derselben Stärke in dem Abstande von einem Zentimeter (in Luft) mit der Krafteinheit abstösst. (Art. 141.)

Magnetisches Potential. Da das magnetische Potential durch die Arbeit gemessen wird, welche verrichtet wird, wenn man einen magnetischen Einheitspol gegen die magnetischen Kräfte bewegt, so wird die Einheit des magnetischen Potentials durch die Arbeitseinheit, das Erg, gemessen.

Einheit der magnetischen Potentialdifferenz. Diese findet statt zwischen 2 Punkten, wenn es eines Arbeitsaufwandes von einem Erg bedarf, um einen (nordsuchenden) Einheitspol von einem Punkte nach einem andern, den magnetischen Kräften entgegen, zu bewegen. Die *magnetomotorische Kraft* wird durch dieselben Einheiten gemessen, wie die magnetische Potentialdifferenz.

Intensität des magnetischen Feldes. Dieselbe wird durch die

Kraft gemessen, welche das Feld auf einen magnetischen Einheitspol ausübt. Daher ist

Einheit der Intensität des Feldes diejenige, welche auf einen (nordsuchenden) Einheitspol die Krafteinheit ausübt. Für diese Einheit hat man die Bezeichnung Gauss vorgeschlagen. Ein Feld mit einer Intensität von 6000 Linien pro Quadratzentimeter würde mit 6 Kilogauss zu bezeichnen sein.

Die *magnetische Flut*, oder die totale Induktion der magnetischen Linien ist gleich der Intensität des Feldes, multipliziert mit seinem Flächeninhalte. Als Einheit gilt eine magnetische Linie.

Magnetischer Widerstand (vergl. Art. 371) ist das Verhältnis der magnetomotorischen Kraft zur magnetischen Flut. Die Einheit des Widerstandes ist diejenige, für welche die Einheit der magnetomotorischen Kraft eine Flut von einer Linie erzeugt.

348. Elektromagnetische Einheiten. Die vorhergehenden magnetischen Einheiten führen zu der folgenden Reihe von elektrischen Einheiten, bei denen die Stromstärke etc. in magnetischem Maße ausgedrückt sind. Das Verhältnis dieser »elektromagnetischen« Einheiten zu den »elektrostatischen« des Art. 278 wird im Art. 354 erklärt.

Einheit der Stromstärke. Ein Strom hat die Stärke eins, wenn ein Zentimeter Drahtlänge, zum Kreisbogen von einem Zentimeter Radius gebogen, auf einen im Mittelpunkte befindlichen magnetischen Einheitspol eine Krafteinheit ausübt. (Art. 202.)

Einheit der Potentialdifferenz (oder der *elektromotorischen Kraft*). Potential ist Arbeit, welche an einer elektrischen Einheit verrichtet wird, deshalb findet die Einheit der Potentialdifferenz zwischen 2 Punkten statt, wenn eine Arbeitseinheit verbraucht wird, um eine Einheit positiver Elektrizität von einem Punkte nach dem andern, der elektrischen Kraft entgegen, zu bewegen. Die Einheit der elektromotorischen Kraft wird erzeugt, wenn eine magnetische Linie pro Sekunde durchschnitten wird.

Einheit des Widerstandes. Ein Konduktor besitzt den Widerstand eins, wenn die Einheit der Potentialdifferenz zwischen

seinen Enden bewirkt, dass ein Strom von der Stärke eins durch ihn hindurchfliesst.

Einheit der Elektrizitätsmenge ist diejenige Menge, welche in einem Einheitsstrome in einer Sekunde fortbewegt wird.

Einheit der Kapazität besitzt ein Körper, der durch die Einheit der Menge auf die Einheit des Potentials gebracht wird.

349. Praktische Einheiten und Normalmaße. Mehrere der obigen »absoluten« Einheiten im C.G.S. System würden bei praktischen Anwendungen ungebührlich gross und andere ungebührlich klein ausfallen. Man hat daher folgende praktische Einheiten aufgestellt:

Widerstand. Das **Ohm** $= 10^9$ absoluten Widerstandseinheiten (theoretisch der Widerstand, den die Geschwindigkeit eines Erdquadranten pro Sekunde bietet, vergl. Art. 352), in Wirklichkeit der Widerstand einer überall gleich dicken Quecksilbersäule von 106,3 cm Länge und 14,4521 g Gewicht, bei 0^0 C. Eine solche Quecksilbersäule heisst ein Normal-Ohm.

Strom. Das **Ampère** (früher das »Weber« genannt) $= 10^{-1}$ absoluten Einheiten; praktisch dargestellt durch den Strom, welcher pro Sekunde 0,001118 g Silber ausscheidet.

Elektromotorische Kraft. Das **Volt** $= 10^8$ absoluten Einheiten, ist diejenige E.M.K., welche in einem Ohm einen Strom von 1 Ampère erzeugt. Das Volt ist $\frac{1000}{1434}$ der E.M.K. eines Clarkschen Normalelements bei 15^0 C.

Menge. Das **Coulomb** $= 10^{-1}$ absoluten Einheiten, ist diejenige elektrische Menge, welche von einem Ampère in einer Sekunde fortbewegt wird.

Kapazität. Das **Farad** $= 10^{-9}$ absoluten Einheiten, ist die Kapazität eines Kondensators, welcher durch 1 Coulomb auf ein Potential von 1 Volt geladen wird. Das *Mikrofarad* oder der 1,000,000ste Teil eines Farads ist gleich 10^{-15} absoluten Einheiten.

Arbeit. Das **Joule** $= 10^7$ absoluten Einheiten (Erg) wird durch die Energie dargestellt, welche 1 Ampère in 1 Ohm pro Sekunde verbraucht.

Kraft. Das **Watt** $= 10$ absoluten Krafteinheiten, ist die

Kraft eines Stromes von 1 Ampère, der unter dem Drucke von 1 Volt fliesst. Dasselbe ist gleich 1 Joule pro Sekunde, annähernd der 746ste Teil einer Pferdekraft.

Induktion. Das **Henry** $= 10^9$ absoluten Einheiten, ist die Induktion in einem Stromleiter, wenn die in ihm induzierte E.M.K. 1 Volt beträgt, während der induzierende Strom um 1 Ampère pro Sekunde stärker oder schwächer wird.

Da es sich jedoch herausstellte, dass Elektriker Grössen zu messen hatten, welche millionenmal grösser oder kleiner sind, so benutzt man die Vorsilben mega und mikro, um das millionenfache, resp. den millionensten Teil zu bezeichnen. So ist z. B. ein Megohm ein Widerstand von 1,000,000 Ohm, und ein Mikrofarad eine Kapazität von 0,000001 Farad. Die Vorsilbe Kilo gebraucht man für das 1000fache und milli für 0,001. So ist ein Kilowatt = 1000 Watt, und ein Milliampère = 0,001 Ampère.

Das »praktische« System kann man als ein System von Einheiten betrachten, welche nicht aus den fundamentalen Einheiten Zentimeter, Gramm, Sekunde abgeleitet werden, sondern aus einem Systeme, bei welchem die Längeneinheit der Erdquadrant, die Masseneinheit $= 10^{-11}$ g ist, die Sekunde dagegen als Zeiteinheit beibehalten ist.

350. Indexbezeichnung. Der Umstand, dass die Elektriker mit Grössen zu thun haben, welche teils durch sehr grosse, teils durch sehr kleine Zahlen auszudrücken sind, war die Veranlassung, dass ein System der Indexbezeichnung eingeführt wurde, um der Anwendung langer Ziffernreihen überhoben zu sein. In diesem Systeme werden nur die Hauptziffern einer Grösse niedergeschrieben, während die Endziffern, oder im Falle eines langen Dezimalbruchs, die Anfangsziffern durch einen darübergeschriebenen Index angedeutet werden. Demgemäss lässt sich die Zahl 1000 $= 10 \times 10 \times 10$ durch 10^3 und die Zahl 42,000 durch 42×10^3 wiedergeben; die brittische Nationalschuld im Betrage von 770,000,000 £ durch 77×10^7. Brüche haben negative Indices, wenn dieselben als Exponenten geschrieben

werden. So ist $\frac{1}{100} = 0{,}01 = 10^{-2}$ und $0{,}00028 = 28 \times 10^{-5}$. Der Nutzen dieser Schreibweise soll an einigen Beispielen über Elektrizität gezeigt werden. Die elektrostatische Kapazität der Erde ist 630,000,000 mal grösser als diejenige einer Kugel von einem Zentimeter Radius, also $63 \cdot 10^7$ (elektrostatische) Einheiten. Der Widerstand des Selens ist ungefähr 40,000,000,000 oder 4×10^{10} mal grösser als derjenige des Kupfers: derjenige der Luft ist ungefähr 10^{26} mal grösser oder

100,000,000,000,000,000,000,000,000mal.

Die Geschwindigkeit des Lichts beträgt ungefähr 30,000,000,000 Zentimeter pro Sekunde oder 3×10^{10}.

351. Dimensionen der magnetischen und elektromagnetischen Einheiten. Der Fundamentalbegriff der »Dimension« ist in Art. 279 erklärt. Eine leichte Ueberlegung wird den Leser in den Stand setzen, folgende Tabelle selbständig abzuleiten:

	Einheiten.	Dimensionen.
	Magnetische:	
m	Polstärke / Menge des Magnetismus $= \sqrt{\text{Kraft} \times (\text{Abstand})^2} =$	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}$
V	Magnetisches Potential $= \frac{\text{Arbeit}}{\text{Polstärke}} =$	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}$
H	Intensität des Feldes $= \frac{\text{Kraft}}{\text{Polstärke}} =$	$M^{\frac{1}{2}} L^{-\frac{1}{2}} T^{-1}$
N	Magnetische Flut = Intensität $\times$ Fläche $=$	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}$
Z	Widerstand $= \frac{\text{Flut}}{\text{Mag. Potential}} =$	L
	Elektromagnetische:	
C	Strom (Stärke) = Intensität des Feldes $\times$ Länge $=$	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}$
Q	Menge = Strom $\times$ Zeit $=$	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}}$
V / E	Potential / Elektromotorische Kraft $= \frac{\text{Arbeit}}{\text{Menge}} =$	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-2}$
R	Widerstand $= \frac{\text{E.M K.}}{\text{Strom}} =$	LT^{-1}
K	Kapazität $= \frac{\text{Menge}}{\text{Potential}} =$	$L^{-1} T^2$
W	Kraft = Strom $\times$ Potential $=$	$M \cdot L^2 T^{-3}$
L / M	Selbstinduktion / Gegenseitige Induktion $= \frac{\text{E.M.K.}}{\text{Strom pro Sek.}} =$	L

352. Der Widerstand als Geschwindigkeit ausgedrückt. Aus der obigen Tabelle über die »Dimensionen« der elektromagnetischen Einheiten ersehen wir, dass die Dimensionen des Widerstandes durch LT^{-1} gegeben sind: das sind aber dieselben Dimensionen, wie die der Geschwindigkeit. Jeder Widerstand kann als **Geschwindigkeit** ausgedrückt werden. Folgende Betrachtungen werden den Leser in den Stand setzen, sich hiervon eine physikalische Vorstellung zu verschaffen: — Angenommen, wir hätten einen Stromleiter, welcher aus zwei horizontalen Schienen CS und DT besteht (Fig. 170), die einen Abstand von

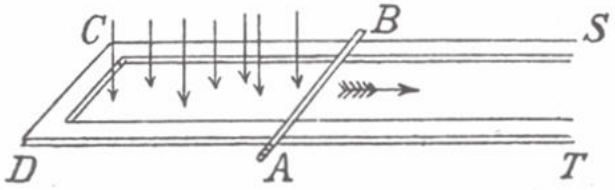


Fig. 170.

einem Zentimeter haben, durch CD verbunden und durch ein Gleitholz AB vervollständigt sind. Dieser veränderliche Stromleiter befinde sich in einem gleichförmigen magnetischen Felde von der Intensität 1, und die Kraftlinien seien senkrecht nach unten durch den Stromleiter gerichtet. Wird nun das Gleitholz nach ST mit einer Geschwindigkeit von n Zentimetern pro Sekunde bewegt, so wird die Zahl der hinzutretenden Kraftlinien, welche vom Stromleiter eingeschlossen werden, im Verhältnis n pro Sekunde zunehmen; oder mit andern Worten, es tritt eine induzierte elektromotorische Kraft (Art. 220) auf, welche dem Stromleiter eingepresst wird, und welche einen durch das Gleitholz von A nach B fliessenden Strom veranlasst. Sind die Schienen ohne Widerstand, so hängt die Stromstärke von dem Widerstande AB ab. Nun bewege sich AB mit solcher Geschwindigkeit, dass der Strom die Stärke 1 erhält. Ist sein Widerstand eine »absolute« (elektromagnetische) Einheit, so braucht es sich bloss mit einer Geschwindigkeit von einem Zentimeter pro Sekunde zu bewegen. Ist sein Widerstand grösser, so muss es sich mit einer entsprechend grössern Geschwindigkeit

bewegen; da die Geschwindigkeit, mit welcher es sich bewegen muss, um einen Strom von der Stärke 1 zu unterhalten, numerisch seinem Widerstande gleich ist. *Der als »ein Ohm« bekannte Widerstand ist gleich 10^9 absoluten elektromagnetischen Einheiten, und wird daher durch eine Geschwindigkeit von 10^9 Zentimetern oder 10 Millionen Metern* (= einem Erdquadranten) *pro Sekunde dargestellt.*

353. Bestimmung des Ohm. Das System praktischer Einheiten wurde ursprünglich von der »British Association« aufgestellt, welche auch den Wert des Ohm durch den Versuch im Jahre 1863 bestimmte, und Normal-Widerstandsrollen aus Argentan konstruierte, welche »B.A. Einheiten« oder »Ohm« genannt wurden.

Es giebt verschiedene Methoden, den absoluten Wert des Widerstandes eines Drahtes zu messen. Eine Methode (die Joule'sche) besteht darin, die Wärme zu messen, die in demselben von einem bekannten Strome erzeugt wird und dann seinen Widerstand nach dem Joule'schen Gesetze zu berechnen (Art. 422). Eine andere Methode (die Weber'sche) besteht darin, in absoluten Einheiten den Strom zu messen, welchen eine ebenfalls absolut gemessene E.M.K. durch den Draht schickt. Das Verhältnis der letztern zum ersten giebt den Wert des Widerstandes. Weber's Methode setzte eine rotierende Rolle in einem magnetischen Felde voraus, welches Wechselströme erzeugt. Kohlrausch benutzte zur Erzeugung der E.M.K. eine Induktionsrolle. Lorenz schlug eine Methode vor, bei welcher eine Scheibe in Rotation versetzt wurde; Foster eine Nullmethode, bei welcher die E.M.K. in der rotierenden Rolle kompensiert wurde. Kelvin machte der British Association den Vorschlag, Weber's Methode in folgender Weise abzuändern. Da es praktisch unausführbar war, einem horizontalen Gleitholz eine so grosse Geschwindigkeit zu erteilen, wie nötig war, so wurde die Geschwindigkeit, welche dem Widerstande eines Drahtes entsprach, auf folgende Weise gemessen: Ein ringförmiger Draht (von vielen Windungen), der um eine vertikale Achse drehbar ist (Fig. 171), wurde in

sehr schnelle gleichförmige Umdrehung versetzt. Ein solcher Ring durchschneidet beim Rotieren die Kraftlinien des Erdmagnetismus. In der nördlichen Hälfte des Ringes wird, während sie sich von Westen nach Osten bewegt, ein aufwärts gehender Strom induziert (vergl. die Regel Art. 220), wogegen in der südlichen Hälfte beim Rotieren von Osten nach Westen ein abwärts gehender Strom induziert wird. Daher wirkt der rotierende Ring während der Drehung als sein eigenes Galvanometer, wenn ein kleiner Magnet in seine Mitte gehängt wird; da der Einfluss des Magnetismus, welcher von dem rotierenden Ringe herrührt, der horizontalen Komponente des Erdmagnetismus, der Rotationsgeschwindigkeit und der Anzahl der Drahtwindungen des Ringes direkt, und dem Widerstande des Drahtes umgekehrt proportional ist. Da also alle andern Data bekannt sind, so lässt sich der Widerstand berechnen und *als Geschwindigkeit* messen. Die ersten *Ohm oder B. A. Einheiten* wurden durch Vergleich mit diesem rotierenden Ringe gemessen; da man jedoch in Zweifel darüber war, ob die B. A. Einheit wirklich 10^9 Zentimeter pro Sekunde darstellt, so wurde im Jahre 1880 eine abermalige Bestimmung des Ohm von dem Komitee der British Association vorgenommen.

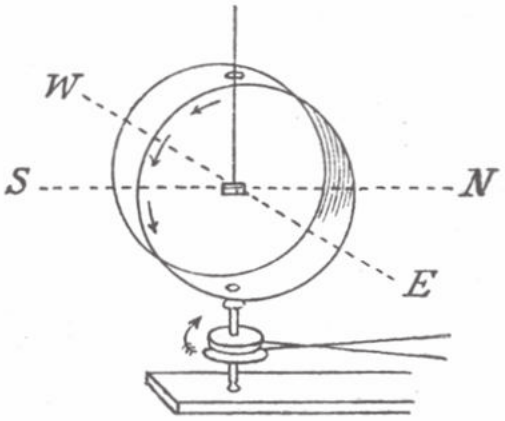


Fig. 171.

Auf dem ersten internationalen elektrischen Kongress in Paris im Jahre 1881 wurde die Wiederbestimmung des Ohm beschlossen und man kam auch überein, die praktischen Normal-Maße nicht mehr aus Argentandraht anzufertigen, sondern nach dem ursprünglich von Siemens gemachten Vorschlage, das praktische Ohm als den Widerstand einer Säule reinen Quecksilbers von bestimmter Länge und einem Millimeter Querschnitt zu definieren. Die ursprüngliche »Siemens'sche Einheit« war eine Quecksilbersäule von einem Meter Länge und einem Quadratmillimeter Querschnitt und betrug etwas weniger als ein Ohm

(0,9540 B. A. Einheiten). Nachdem die ersten Physiker Europa's Messungen angestellt hatten, bestimmte der Pariser Kongress von 1884, dass die Quecksilbersäule, welche das »gesetzliche« Ohm darstellt, eine Länge von 106 Zentimetern haben soll. Dies wurde jedoch weder in England noch in Amerika als gesetzlich anerkannt, da man wusste, dass dieser Wert ungenau ist. Rayleigh's Bestimmung ergab 106,21 cm Quecksilber als wahren Wert des theoretischen Ohms (= 10^9 absoluten Einheiten); und Rowland's Bestimmungen in Baltimore ergaben einen etwas grössern Wert. Die British Association kam im Jahre 1892 dahin überein, die Länge auf 106,3 cm festzusetzen und nach Masse und nicht nach Querschnitt zu definieren. Dies wurde schliesslich auf dem Kongress zu Chicago (1893) als das *internationale Ohm* bestimmt. Diese internationalen Einheiten sind jetzt in England und den vereinigten Staaten gesetzlich.

Die alte B. A. Einheit beträgt nur 0,9863 des wahren Ohm; die Siemens'sche Einheit beträgt den 0,9408. Teil.

354. Verhältnis der elektrostatischen zu den elektromagnetischen Einheiten. Wenn der Leser die Tabelle der Dimensionen der elektrostatischen Einheiten des Art. 278 mit derjenigen der Dimensionen der elektromagnetischen Einheiten des Art. 351 vergleicht, so wird er bemerken, dass in beiden Systemen die den gleichen Einheiten erteilten Dimensionen nicht dieselben sind. So sind z. B. die Dimensionen der »Menge« im elektrostatischen Maß $M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}$ und im elektromagnetischen Maß $M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}}$. Indem wir beides durch einander dividieren, ergiebt sich LT^{-1}, eine Grösse, welche wir sogleich als eine Geschwindigkeit erkennen. Diese Geschwindigkeit tritt in jedem Falle bei dem Verhältnis des elektrostatischen zum elektromagnetischen Maße jeder Einheit auf. Sie ist eine bestimmte konkrete Geschwindigkeit, und stellt diejenige Geschwindigkeit dar, mit welcher sich zwei elektrische Teilchen neben einander bewegen müssen, damit ihre gegenseitige elektromagnetische Anziehung (als gleichbedeutend mit der Bewegung zweier

parallelen Ströme genommen) gerade ihrer gegenseitigen elektrischen Abstossung gleichkomme (vergl. Art. 255). Diese Geschwindigkeit v, welche in der elektromagnetischen Theorie des Lichts (Art. 513) von grosser Wichtigkeit ist, ist in verschiedener Weise gemessen worden.

Einheit.	Elektrostatische.	Elektromagnetische.	Verhältnis.
Menge . .	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}$	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}}$	$L T^{-1} = v$
Potential . .	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-2}$	$L^{-1} T = \frac{1}{v}$
Kapazität .	L	$L^{-1} T^2$	$L^2 T^{-2} = v^2$
Widerstand .	$L^{-1} T$	$L T^{-1}$	$L^{-2} T^2 = \frac{1}{v^2}$

a) Weber und Kohlrausch maßen die elektrostatische Mengeneinheit und verglichen dieselbe mit der elektromagnetischen Mengeneinheit, und fanden für das Verhältnis v den Wert $3{,}1074 \times 10^{10}$ Zentimeter pro Sekunde.

b) Kelvin verglich die beiden Potentialeinheiten und fand

$$v = 2{,}825 \times 10^{10}$$

und später $v = 2{,}93 \times 10^{10}$.

c) Clerk Maxwell hielt einer elektrostatischen Anziehungskraft das Gleichgewicht durch eine elektromagnetische Abstossungskraft und fand

$$v = 2{,}88 \times 10^{10}.$$

d) Ayrton und Perry maßen die Kapazität eines Kondensators auf elektromagnetischem Wege, indem sie denselben in ein ballistisches Galvanometer entluden, und auf elektrostatischem Wege, indem sie die Kapazität aus seiner Grösse berechneten und fanden

$$v = 2{,}980 \times 10^{10}.$$

Die Geschwindigkeit des Lichtes wird zu $2{,}9992 \times 10^{10}$ angenommen, demnach $v = 3 \times 10^{10}$, oder 30,000 Millionen Zentimeter pro Sekunde.

355. Rationalisierung der Dimensionen der Einheiten. Es erscheint widersinnig, dass zwei verschiedene Einheiten der

Elektrizität vorhanden sind; und noch mehr, dass die eine Einheit 30,000 Millionen Zentimeter pro Sekunde grösser sein soll als die andere. Ebenso widersinnig ist es, dass die Dimensionen einer elektrischen Einheit Bruchpotenzen sind, da Grössen wie $M^{\frac{1}{2}}$ und $L^{\frac{3}{2}}$ keinen Sinn haben. Diese Irrationalitäten rühren daher, dass wir die Eigenschaften des Mediums unberücksichtigt liessen, als wir das Gesetz vom umgekehrten quadratischen Verhältnis dazu benutzten, die Definitionen der elektrischen Einheit in dem elektrostatischen und des Einheitspoles in dem magnetischen System aufzustellen. Würden wir im erstern die dielektrische Konstante k und in dem letztern die Permeabilität μ einführen, so wären wir, vorausgesetzt, dass wir die Dimensionen dieser Grössen kennen, im Stande, die Dimensionsformeln zu rationalisieren. Allein wir kennen jene Dimensionen nicht. Nun hat aber Rücker gezeigt, dass sie sich rationalisieren lassen und beide Systeme von Einheiten zur Uebereinstimmung[1]) gebracht werden können durch die Annahme, dass das Produkt

$$k\mu = \frac{1}{v^2}$$

sei. Wäre k der reciproke Wert des Aethers und μ seine Dichte, so würde v die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen in demselben bedeuten. (Vergl. die elektromagnetische Theorie des Lichtes, Vorl. 55).

356. Erdmagnetische Kraft in absoluten Einheiten. Wenn man absolute Strommessungen mit dem Tangentengalvanometer anstellt, oder elektromotorische Kräfte mit der rotierenden Rolle bestimmt, muss man den absoluten Wert des erdmagnetischen Feldes oder seiner horizontalen Komponenten kennen. Die Intensität der erdmagnetischen Kraft an einem Orte ist die Kraft, mit welcher ein Magnetpol von der Stärke 1 angezogen wird. Wie im Art. 148 ausgeführt wurde, ist es üblich, die horizontale Komponente H dieser Kraft zu messen, und hieraus, sowie aus dem cosinus des Inklinationswinkels die totale Kraft zu berechnen,

1) Vergl. Everett's Einheiten und physikalische Konstanten.

da die direkte Bestimmung der totalen Kraft Schwierigkeiten bietet. Um H in absoluten (oder C.G.S.) Einheiten zu bestimmen, sind zwei Beobachtungen an einem Magnete vom magnetischen Moment M erforderlich (Art. 135). Bei der einen dieser Beobachtungen wird das Produkt MH durch eine *Methode der Schwingungen* bestimmt; bei der zweiten wird der Quotient $\frac{M}{H}$ durch eine besondere *Methode der Ablenkung* bestimmt; dann ergiebt sich H als Quadratwurzel aus der Zahl, welche man erhält, wenn man MH durch $\frac{M}{H}$ dividiert.

1) Bestimmung von MH. — Die Zeit t einer vollständigen Schwingung (Hin- und Herbewegung) eines Magnetstabes ist

$$t = 2\pi \sqrt{\frac{K}{HM}},$$

wo K das »Trägheitsmoment« des Magnets bedeutet. Diese Formel gilt jedoch nur für sehr kleine Oszillationen. Durch algebraische Transformation folgt:

$$HM = \frac{4\pi^2 K}{t^2}.$$

Von diesen Grössen bestimmt man t durch eine direkte Beobachtung der Schwingungszeit eines an einen torsionslosen Faden aufgehängten Magnets; und K kann entweder durch den Versuch bestimmt werden oder nach einer der folgenden Formeln:

Für einen runden Stab ist $K = w\left(\frac{l^2}{12} + \frac{a^2}{4}\right)$;

für einen rechteckförmigen Stab ist $K = \frac{1}{12} w (l^2 + b^2)$. Hier bedeutet w die Masse des Stabes in Grammen, l seine Länge, a seinen Radius (falls der Stab rund), b seine horizontal gemessene Breite (falls derselbe von recheckigem Querschnitt).

2) Bestimmung von $\frac{M}{H}$. Darauf wird durch den Magnet eine kleine Magnetnadel abgelenkt, und zwar so, dass seine Breitseite dabei derselben zugewandt ist. Der Magnet wird horizontal und rechtwinklig zum magnetischen Meridian aufgestellt, so dass

sein Mittelpunkt genau der (magnetische) Süden resp. Norden der kleinen Nadel ist und von ihrem Mittelpunkte den Abstand r hat. In dieser Lage wird der Nordpol der Nadel vom Nordpol des Magnets abgestossen, vom Südpol desselben angezogen, während der Südpol der Nadel entgegengesetzte Wirkungen erfährt. Die vollständige Wirkung des Magnets auf die Nadel ist eine Ablenkung der letztern um einen Winkel δ, dessen Tangente dem Quotienten $\frac{M}{H}$ direkt proportional ist und umgekehrt proportional dem Kubus des Abstandes r; d. h.

$$\frac{M}{H} = r^3 \tan \delta.$$

Durch Division von MH durch $\frac{M}{H}$ ergiebt sich

$$H^2 = \frac{4\pi^2 K}{t^2 r^3 \tan \delta}$$

folglich $$H = \frac{2\pi}{t}\sqrt{\frac{K}{r^3 \tan \delta}}.$$

XXVIII. VORLESUNG: *Eigenschaften des Eisens und Stahls.*

357. Magnetisierung des Eisens. Wird ein Stück eines magnetisierbaren Metalls in ein magnetisches Feld gebracht, so gehen einige der magnetischen Kraftlinien durch dasselbe und magnetisieren es. Die Intensität der Magnetisierung hängt von der Intensität des benutzten Feldes und von dem Metall selbst ab. Man kann sich hierüber zwei verschiedene Vorstellungen machen, von denen jede ihre besondern Vorzüge hat. Wir können die innere Beschaffenheit des Metalls und die Anzahl der magnetischen Linien in's Auge fassen, welche durch dasselbe hindurchgehen und aus demselben in den umgebenden Raum treten. Dies ist die neuere Auffassung. Oder wir können uns den Magnetismus des Eisens oder eines andern Metalls als etwas an den Polflächen haftendes denken, welches demnach in magnetischen Einheiten ausgedrückt wird. Dies ist die ältere Anschauungsweise.

Die Thatsache, dass weiches Eisen, welches man in ein magnetisches Feld bringt, in hohem Grade magnetisch wird, lässt sich dann in doppelter Weise aussprechen: 1) Wird Eisen in ein magnetisches Feld gebracht, so gehen die magnetischen Linien in grösserer Menge durch den jetzt vom Eisen eingenommenen Raum, denn Eisen ist in Bezug auf die Linien der magnetischen Induktion sehr *durchlässig*, da es ein guter Leiter der magnetischen Linien ist. 2) Wird Eisen in ein magnetisches Feld gebracht, so entwickelt es starke Pole an seinen Endflächen, da es für die Magnetisierung ein grosses *Aufnahmevermögen* besitzt. Jede dieser Vorstellungen lässt sich durch Einführung geeigneter Koeffizienten präzisieren.

358. Durchlässigkeit (Permeabilität). Der exakte Begriff, welchen man heutzutage mit diesem Ausdrucke verbindet, ist der eines numerischen Koeffizienten. Angenommen, eine magnetische Kraft, — welche von einem in einer umgebenden Rolle zirkulierenden Strome herrühren möge — wirkte auf einen mit Luft erfüllten Raum, so würde eine gewisse Anzahl magnetischer Linien in diesem Raume auftreten. In der That wird die Intensität der magnetischen Kraft, welche mit H bezeichnet wird, oft dadurch ausgedrückt, dass man sagt, sie würde in der Luft H magnetische Linien pro Quadratzentimeter erzeugen. Wenn nun der dieser magnetischen Kraft gebotene Raum nicht mit Luft, sondern mit Eisen angefüllt wäre, so würde infolge der obigen magnetischen Kraft des Eisens eine grössere Zahl magnetischer Linien pro Quadratzentimeter entstehen. Diese grössere Zahl magnetischer Linien im Eisen drückt den Grad der Magnetisierung [1]) des Eisens aus, was durch den Buchstaben B bezeichnet wird. Das Verhältnis von B zu H giebt die *Permeabilität*

1) Die wirkliche Anzahl B der magnetischen Linien, welche durch die Flächeneinheit des Querschnitts im Eisen oder einem andern Körper hindurchgehen, wird verschieden benannt: »Permeation« oder »innere Magnetisierung« oder »Induktion«. Der letztere Ausdruck wurde von Maxwell und Hopkinson gebraucht, ist aber besser zu vermeiden. Eine geeignetere Bezeichnung ist »Flutdichte«.

des Körpers an. Letztere wird gewöhnlich mit dem griechischen Buchstaben μ bezeichnet. Daher:

$$\mu = \frac{B}{H}.$$

Wenn z. B. eine bestimmte Eisensorte einer magnetischen Kraft unterworfen wird, welche in der Luft 50 magnetische Linien pro Quadratzentimeter erzeugen kann, so möge das Eisen von 16,062 magnetischen Linien pro Quadratzentimeter durchdrungen werden. Wenn wir dann die letztere Zahl durch die erstere dividieren, so erhalten wir den Wert der Permeabilität bei dieser Magnetisierungsstufe, nämlich $\mu = 321$, d. h. die Permeabilität des Eisens ist 321mal grösser als die der Luft.

Die Permeabilität ist stets positiv; für den leeren Raum ist sie gleich 1, für Luft in Wirklichkeit auch gleich 1; für magnetische Körper ist sie grösser als 1; für diamagnetische Körper etwas kleiner als 1. Für Luft ist $B = H$.

Wo die magnetischen Linien an einer Polfläche in die Luft austreten, stehen sie natürlich mit den innern Linien in Verbindung: Der Wert von B innerhalb der Polfläche ist derselbe wie der in der unmittelbar davor befindlichen Luft.

Die Permeabilität von nicht magnetischen Körpern, wie Seide, Baumwolle und anderen Isolatoren, auch von Messing, Kupfer und allen nicht magnetischen Metallen, wird gleich 1 genommen, da sie in Wirklichkeit dieselbe wie die der Luft ist.

Die vorstehende Erklärung wird jedoch durch die Thatsache modifiziert, dass für alle Eisensorten ein Zustand der magnetischen Sättigung eintritt. Bei allen Eisensorten nimmt die Magnetisierbarkeit des Stoffes ab, wenn die wirkliche Magnetisierung weiter und weiter getrieben wird. Mit andern Worten, wenn ein Stück Eisen bis zu einem gewissen Grade magnetisiert ist, so wird dasselbe für weitere Magnetisierung weniger durchlässig, und obgleich eine wirkliche Sättigung niemals erreicht wird, giebt es doch in der Praxis eine Grenze, über welche hinaus die Sache nicht gut getrieben werden kann. Dieses Streben nach einer Grenze wurde von Joule entdeckt. Die praktische

Grenze für B in gutem Schmiedeeisen beträgt circa 20,000 Linien pro Quadratzentimeter und circa 12,000 in Gusseisen. Bei Anwendung von aussergewöhnlichen magnetisierenden Kräften gelang es Ewing, die Grösse B auf 45,000 zu bringen, und Du Bois erzielte sogar 60,000 Linien pro Quadratzentimeter.

Manganstahl ist sonderbarer Weise nicht magnetisch; Hopkinson fand 310 als Maximum von B.

359. Magnetisierungskurven. Ein geeignetes Mittel, das magnetische Verhalten einer besondern Eisensorte zu veranschaulichen, besteht darin, dass man eine Magnetisierungskurve aufzeichnet, d. h. diejenige Kurve, bei welcher die Werte der magnetischen Kraft H als Abscissen und die entsprechenden Werte der Magnetisierung B als Ordinaten aufgetragen werden. In Fig. 172 sieht man, entsprechend den Untersuchungen von

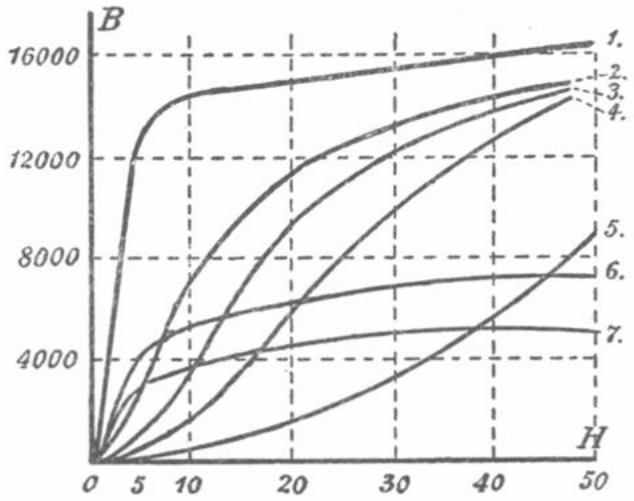


Fig. 172.

Ewing, 5 Kurven, welche sich auf weiches Eisen, gehärtetes Eisen, ausgeglühten Stahl, gehärteten Stahl und glasharten Stahl beziehen. Man wird bemerken, dass alle diese Kurven dieselbe allgemeine Gestalt haben, und dass man 3 Stufen unterscheiden kann: 1) Für kleine Werte von H ist auch B klein, und wenn H zunimmt, so nimmt auch B allmählich zu. 2) Die Kurve steigt sehr schnell, wenigstens für alle weichern Eisensorten. 3) Darauf krümmt sich die Kurve und verläuft fast horizontal, indem B sehr langsam wächst. Wenn die Magnetisierung in dem Stadium unterhalb der Biegung der Kurve ist, so sagt man,

dass das Eisen weit vom Zustande der Sättigung entfernt ist. Ist jedoch die Magnetisierung über die Biegung der Kurve hinaus bis in die dritte Stufe getrieben, so sagt man, das Eisen nähere sich der Sättigung, weil bei dieser Stufe der Magnetisierung ein grosser Zuwachs der magnetisierenden Kraft erforderlich ist, um einen verhältnismässig geringen Zuwachs der Magnetisierung zu erhalten. Man wird bemerken, dass für weiches Schmiedeeisen die Stufe der beginnenden Sättigung erreicht wird, wenn B ungefähr den Wert 16,000 oder H ungefähr den Wert 50 hat. Dem Leser sei dringend empfohlen, sich ähnliche Kurven mit Hilfe der nachfolgenden Tabelle zu entwerfen, welche sich auf die Permeabilität einiger von Hopkinson untersuchten Eisensorten bezieht.

Ausgeglühtes Schmiedeeisen.			Graues Gusseisen.		
B	μ	H	B	μ	H
5000	3000	1,66	4000	800	5
9000	2250	4	5000	500	10
10,000	2000	5	6000	279	21,5
11,000	1692	6,5	7000	133	42
12,000	1412	8,5	8000	100	80
13,000	1083	12	9000	71	127
14,000	823	17	10,000	53	188
15,000	526	28,5	11,000	37	292
16,000	320	50			
17,000	161	105			
18,000	90	200			
19,000	54	350			
20,000	30	666			

Wie man sieht, hat die Permeabilität ungeheuer grosse Werte, wenn die Magnetisierungsstufe noch niedrig ist, für mässig schwache Felder, wo H weniger als 5 beträgt. Dagegen ist die Permeabilität sehr gering, in der Regel circa 300, wenn H weniger als 0,5 beträgt.

Die drei beim Magnetisieren beobachteten Stufen sind in Ewing's Molekulartheorie (Art. 127) erklärt. Wird das Eisen gepresst, so nimmt seine Permeabilität ab; bei einer Spannung nimmt sie zu, vorausgesetzt, dass das Feld nicht zu stark ist. Villari fand, dass jenseits einer gewissen Insensität die Permeabilität durch Spannung verringert wird.

360. Magnetisches Aufnahmevermögen oder Susceptibilität. Angenommen, ein Magnet besässe m magnetische Einheiten an jedem Pole, und es sei l der Abstand seiner Pole, so heisst das Produkt m . l sein *magnetisches Moment*, und der Quotient aus dem magnetischen Moment und seinem Volumen heisst seine *Magnetisierungsstärke;* dieser Ausdruck soll uns, obgleich er auf der Flächeneinheit der Polstärke beruht, eine Vorstellung von dem innern magnetischen Zustande verschaffen. Da nun das Volumen gleich dem Produkte aus Querschnitt und Länge ist, so folgt, dass, wenn ein Stück Eisen oder Stahl von gleichförmigem Querschnitt seinen Oberflächenmagnetismus nur an seinen Enden hätte, seine Magnetisierungsstärke J gleich der Polstärke dividiert durch die Endfläche s sein würde, also:

$$J = \frac{\text{Magnet . Moment}}{\text{Volumen}} = \frac{m \,.\, l}{s \,.\, l} = \frac{m}{s}.$$

Nehmen wir nun an, dass diese Magnetisierungsstärke von einem magnetischen Felde mit der Intensität H herrühre, so lässt sich das Verhältnis der resultierenden Magnetisierungsstärke J und der magnetisierenden Kraft H durch einen numerischen Magnetisierungskoeffizienten k, die *Susceptibilität,* darstellen, und es ist

$$k = \frac{J}{H} \text{ oder } J = k \,.\, H.$$

Wir können demnach sagen, dass jeder magnetischen Linie des Feldes k magnetische Einheiten an der Endfläche entsprechen. Für magnetische Substanzen, wie für Eisen, Stahl, Nickel u. s. w. hat die Susceptibilität k positive Werte; doch giebt es viele Körper, wie Wismut, Kupfer, Quecksilber u. s. w., welchen schwach negative Koeffizienten zukommen. Letztere heissen »diamagnetische Körper« (Art. 364) und werden von den Magnet-

polen offenbar abgestossen. Am Ende des Art. 333 wurde gezeigt, dass von jedem magnetischen Einheitspol 4π magnetische Linien ausgehen. Wenn also, wie oben nachgewiesen, jede Kraftlinie des magnetisierenden Feldes k magnetische Einheiten erzeugt, so werden durch das Eisen jeder einzelnen Linie des Feldes noch $4\pi k$ Linien hinzugefügt, oder die Permeabilität des Eisens ist $\mu = 1 + 4\pi k$; folglich ist $B = H + 4\pi . k . H$. Hieraus geht hervor, dass B gleichzeitig mit H wächst, ohne eine bestimmte Grenze zu haben. Da aber k abnimmt, wenn die Sättigung anfängt, so kann die Oberflächen-Magnetisierung J (welche proportional zu B—H ist) einmal eine Grenze erreichen. Dieses Maximum von B—H ist ungefähr 21360 für Schmiedeeisen, 15580 für Gusseisen und 5660 für Nickel.

Die folgende Tabelle enthält einige Angaben der von Bidwell mit Schmiedeeisen angestellten Versuche.

H	k	J	μ	B
3,9	151,0	587	1899,1	7390
10,3	89,1	918	1121,4	11550
40	30,7	1226	386,4	15460
115	11,9	1370	150,7	17330
208	7,0	1452	88,8	18470
427	3,5	1504	45,3	19330
585	2,6	1530	33,9	19820

Everett hat (nach Beobachtungen von Gauss) berechnet, dass die Intensität der Magnetisierung der Erde nur 0,079 ist, d. h. nur der 17600te Teil von derjenigen, welche vorhanden wäre, wenn die ganze Erdkugel aus Eisen wäre. In schwachen magnetischen Feldern ist die Susceptibilität des Nickels ungefähr 50mal grösser als die des Eisens; in starken Feldern hat jedoch Eisen ein grösseres Aufnahmevermögen.

361. Messung der Permeabilität. Die Permeabilität des Eisens lässt sich auf verschiedene Weise bestimmen, wobei stets die Grösse B mitgemessen wird.

a) *Magnetometer-Methoden.* Die Polstärke langer Stäbe, wel-

che durch eine sie umgebende Rolle magnetisiert werden, lässt sich durch ein Magnetometer (Art. 138) bestimmen, und hieraus findet man N, indem man mit 4π multipliziert.

b) *Induktions-Methoden.* Eisenringe, welche sich nicht durch Magnetometer messen lassen, da sie keine Pole haben, werden auf induktivem Wege gemessen. Um den Ring wird eine magnetisierende Spule gelegt, desgleichen eine Probe-Spule (Art. 227), welche mit einem ballistischen Galvanometer verbunden ist. Indem man den magnetisierenden Strom nähert oder entfernt, oder ihn umkehrt, werden Induktionsströme erzeugt, welche einen Ausschlag des Galvanometers geben, und dieser ist proportional der Anzahl der erzeugten oder vernichteten magnetischen Linien. Eisenstäbe lassen sich auf dieselbe Weise prüfen.

c) *Zug-Methoden.* Der Zug, welcher erforderlich ist, um die beiden Hälften eines geteilten Stabes oder Ringes zu trennen, ist dem Quadrate von B proportional (Art. 379). Bidwell und Andere benutzten diesen Satz zur Bestimmung der Permeabilität.

d) *Optische Methoden.* Du Bois hat eine Methode angewendet, die auf der magneto-optischen Rotation basiert (vgl. Kerr's Entdeckung, Art. 522).

362. Residuum-Wirkungen. Stahl, Magnetstein, hartes Eisen und sogar weiches Eisen, falls dasselbe von länglicher Gestalt ist, behalten den Magnetismus, wie bereits im Art. 98 erwähnt wurde. Wir haben nun noch einige andere Wirkungen des Residuum zu beschreiben. Wird ein noch ungebrauchtes Stück Eisen oder Stahl einer wachsenden magnetisierenden Kraft unterworfen, und lässt man letztere dann wieder bis Null abnehmen, so bleibt etwas Magnetismus zurück. Werden die Resultate mittelst einer Kurve zur Anschauung gebracht, so zeigt diese folgende Eigentümlichkeiten: Wenn H zunächst allmählich von Null aus wächst, so wächst auch B, wie wir im Art. 359 gesehen haben. Ist die Kurve nun bis *a* (Fig. 173) gestiegen und lässt man H dann wieder abnehmen, so fällt der absteigende Ast der Kurve infolge des remanenten Magnetismus nicht mit dem aufsteigenden Ast zusammen. Erreicht H wieder den Wert

Null, so geht die Kurve durch den Punkt *b*. Dieser Residuum-Wert von B heisst *Remanenz*, und ist abhängig von dem Material und von der Höhe, bis zu welcher vorher B getrieben wurde. Wird hierauf eine entgegengesetzte magnetisierende Kraft — H verwendet, so muss dieselbe bis zu einem bestimmten Grade zunehmen, um das Eisen zu entmagnetisieren und damit die Kurve bis zum Punkte *c* zu führen. Der hierzu erforderliche Betrag der entgegengesetzten magnetischen Kraft ist ein Mass für die Retentionskraft des Materials und ist bekannt unter dem Namen *Koerzitivkraft*. Bei hartem Stahl steigt dieselbe auf 100, bei weichem Stahl auf 20, bei weichem Eisen auf 2 oder noch weniger. Wird die entgegengesetzte magnetisierende Kraft dann weiter verstärkt, so geht die Kurve von *c* nach *d* abwärts, das Eisen nimmt die entgegengesetzte Polarität an und nähert sich dem Sättigungspunkte. Nimmt die entgegengesetzte Kraft wieder bis Null ab, so geht die Kurve nach *e*, hier eine negative Remanenz anzeigend. Lässt man H dann abermals wachsen wie anfangs, so steigt die Kurve bis *f* und führt nach *a* zurück, nachdem H seinen früheren Wert wieder bekommen hat.

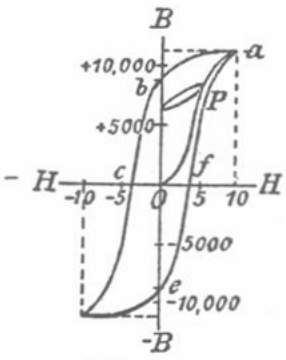


Fig. 173.

363. Magnetisierungscyklen; Hysteresis. Wenn H einen Kreislauf von Wachsen und Abnehmen durchmacht, so vollführt B ebenfalls einen Kreislauf, und wir haben gesehen, dass eine *Verzögerung* der Magnetisierung eintritt, was Fig. 173 dadurch veranschaulicht, dass die Kurve eine rings geschlossene Schlinge bildet. Warburg und Ewing, welche diese Erscheinung gründlich untersucht haben, bemerkten, dass die eingeschlossene Fläche den Energieverbrauch in den einzelnen Operationen angiebt. Für harten Stahl sind die Flächen dieser Schlingen viel grösser als für weiches Eisen. Ewing gebrauchte den Ausdruck **Hysteresis**, um die Verzögerung der magnetischen Wirkungen zu bezeichnen. Seinen Untersuchungen [1]) ist auch die Fig. 174 ent-

1) Wir verweisen den Leser auf Ewing's Schrift über die magnetische Induktion im Eisen.

lehnt, ein Beispiel für weiches Eisen, dessen Kurve verschiedene Schlingen aufweist. Ewing erfand auch einen *Kurvenverzeichner*, mit dessen Hilfe sich die Kurven automatisch entwerfen lassen. Der Energieverbrauch pro Kubikzentimeter in einem Cyklus starker Magnetisierung variiert zwischen 9000 Erg für ausgeglühtes Eisen und 200,000 für glasharten Stahl. Wenn sich der Cyklus 100mal in der Sekunde wiederholt (wie bei dem Eisenkern der Wechselstrom-Transformatoren), so vermag der Kraftverbrauch durch die Hysteresis das Eisen zu erwärmen, und derselbe nimmt stark zu, je öfter und stärker die Magnetisierung bewirkt wird. Falls B nicht mehr als 5000 ist, beträgt die bei 100 Cyklen pro Sekunde verbrauchte Kraft für jeden Kubikfuss Eisen gegen 575 Watt; wird jedoch B auf 10,000 erhöht, so wird der Verbrauch auf 1560 Watt gesteigert.

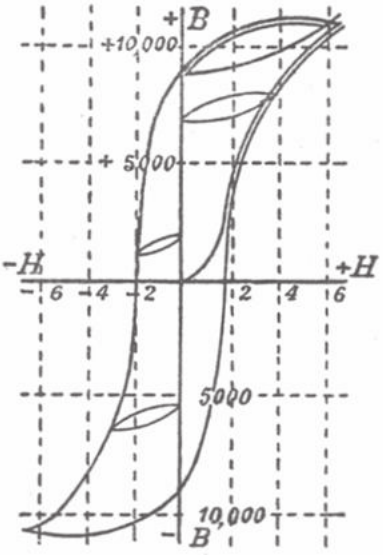


Fig. 174.

Da zur Zerstörung des Magnetismus eine geringere Kraft entgegengesetzter Art genügt, als diejenige, welche den Magnetismus hervorrief, so genügt es, das Eisen einer Reihe von Cyklen von abnehmender Intensität zu unterwerfen, um dasselbe vollständig zu entmagnetisieren.

Durch mechanische Erschütterung werden die magnetisierenden Kräfte in ihrer Wirkungsweise unterstützt und es werden dadurch alle Residuum-Wirkungen und die der Hysteresis geschwächt.

Ewing hat auch gezeigt, dass der Magnetismus unter dem Einflusse einer konstanten magnetisierenden Kraft langsam fortschreitet und für längere Zeit eine schwache Zunahme zeigt: Dies heisst *zähe Hysteresis*.

XXIX. VORLESUNG: *Diamagnetismus.*

364. Diamagnetische Versuche. Im Jahre 1778 machte Brugmans von Leyden die Beobachtung, dass ein Stück Wismut, in die Nähe eines beliebigen Pols einer Magnetnadel gebracht, von demselben abgestossen wurde. Im Jahre 1827 beobachteten Le Baillif und Becquerel, dass auch Antimon von einem Magnetpole abgestossen wird. Im Jahre 1845 untersuchte Faraday mit Hilfe kräftiger Elektromagnete die magnetischen Eigenschaften einer grossen Anzahl von Körpern, und fand, dass viele, wie z. B. Eisen, vom Magnet angezogen, andere dagegen schwach abgestossen werden. Um diese beiden Klassen von Körpern zu unterscheiden, nannte er diejenigen, welche angezogen werden, **paramagnetisch** [1]), diejenigen, welche abgestossen werden, **diamagnetisch**. Die Eigenschaft derselben, von einem Magnet abgestossen zu werden, nannte er **Diamagnetismus**.

Faraday's Versuchsmethode bestand in folgendem. Er hing einen kleinen Stab des Körpers in ein kräftiges magnetisches Feld zwischen die Pole eines Elektromagnets und beobachtete, ob der Stab in eine **axiale** Stellung gezogen wurde, wie in Fig. 175, so dass seine Längsachse mit der Verbindungslinie der beiden Pole zusammenfiel, oder ob derselbe in eine **äquatoriale** Stellung abgestossen wurde, rechtwinklig zur Verbindungslinie der beiden Pole, die Kraftlinien des Feldes durchkreuzend, wie es die Stellung des kleinen Stabes in Fig. 176 zeigt, welcher zwischen die Pole eines nach Ruhmkorff'schen Muster konstruierten Magnets gehängt ist.

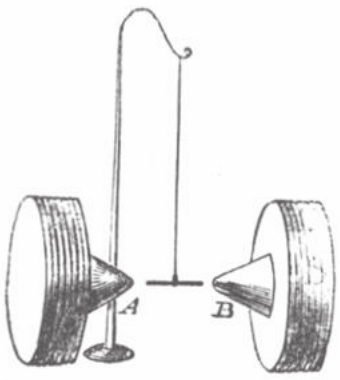


Fig. 175.

1) Oder einfach »magnetisch«. Einige Autoren gebrauchen den Ausdruck »ferromagnetisch«.

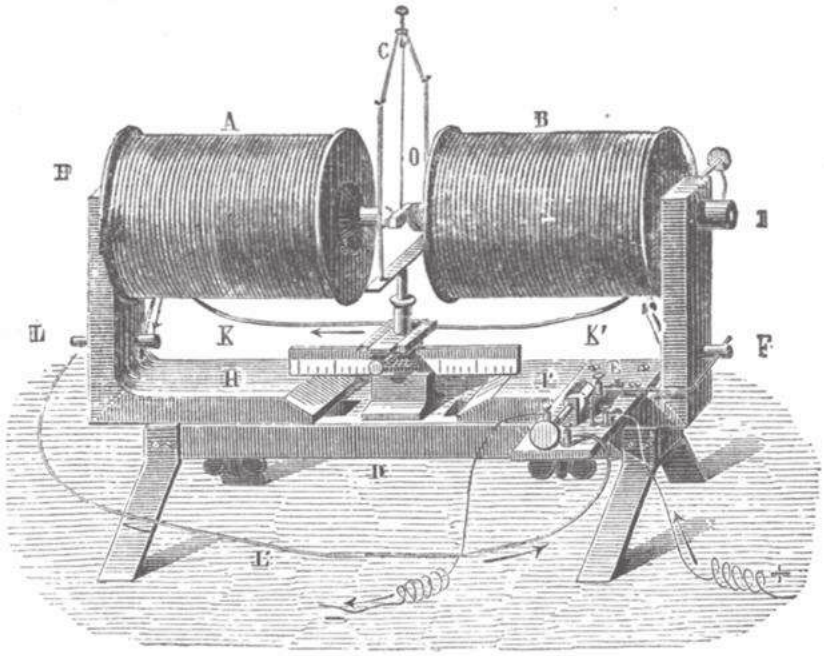


Fig. 176.

365. Resultate. Folgendes sind die Körper, welche nach dieser Methode untersucht worden sind:

Paramagnetisch.	Diamagnetisch.
Eisen.	Wismut, Phosphor,
Nickel.	Antimon, Thallium, Zink,
Kobalt.	Quecksilber, Blei,
Mangan.	Silber, Kupfer,
Chrom.	Gold, Wasser,
Cerium.	Alkohol, Tellur,
Titan.	Schwefel.
Platin [1]).	
Viele Erze und Salze, welche die obigen Metalle enthalten.	
Sauerstoffgas.	
Flüssiger Sauerstoff.	
Ozon.	

Flüssigkeiten wurden in Glasgefässe gegossen und dann zwischen die Pole des Elektromagnets gehängt. Fast alle Flüssig-

1) Chemisch reines Platin ist nach Wiedemann diamagnetisch.

keiten sind diamagnetisch, ausgenommen die Salzlösungen der magnetischen Metalle, von denen einzelne schwach magnetisch sind; Blut dagegen ist diamagnetisch, obgleich es Eisen enthält. Um Gase zu untersuchen, bläst man Gasblasen und beobachtet, ob dieselben in das magnetische Feld gezogen oder aus demselben hinausgetrieben werden. Sauerstoffgas stellte sich als magnetisch heraus: Ozon ist noch stärker magnetisch. Dewar fand, dass flüssiger Sauerstoff noch so stark magnetisch ist, dass er tropfenweise an die Pole eines starken Magnets fliegt.

Die diamagnetischen Eigenschaften der Körper lassen sich numerisch mittelst ihrer *Permeabilität* oder ihrer *Empfänglichkeit* ausdrücken (Art. 358 u. 360). Für diamagnetische Körper ist die Permeabilität kleiner als Eins. Für Wismut ist $\mu = 0{,}999969$. Die Abstossung des Wismuts ist unendlich schwächer, als die Anziehung des Eisens. Plücker verglich die magnetischen Kräfte von gleich schweren Körpern, und fand:

Eisen	+	1,000,000
Magneteisenstein . . .	+	402270
Schwefelsaures Eisenoxyd	+	1110
Eisenvitriol	+	780
Wasser	—	7,8
Wismut	—	23,6

366. Scheinbarer Diamagnetismus als Folge des umgebenden Mediums. Schwach magnetische Körper verhalten sich diamagnetisch, wenn sie in einem stärker magnetischen Mittel aufgehängt werden. Eine kleine Glasröhre, welche mit einer schwachen Lösung von Eisenchlorür gefüllt ist, zeigt die axiale Stellung, d. h. ist paramagnetisch, wenn sie in der Luft zwischen den Polen eines Elektromagnets hängt. Wird sie aber von einer stärkern (und deshalb mehr magnetischen) Lösung desselben Körpers umgeben, so zeigt sie die Aequator-Stellung und wird scheinbar abgestossen wie diamagnetische Körper. Die äquatoriale Stellung eines Körpers beweist also nur, dass derselbe weniger magnetisch ist, als das den umgebenden Raum erfüllende Medium. Ein Ballon steigt, obgleich er Masse und

Gewicht besitzt, in der Luft empor, nach dem Gesetze der Schwere, weil das umgebende Medium stärker angezogen wird, als der Ballon. Man findet jedoch, dass diamagnetische Abstossung auch im leeren Raume stattfindet; daraus scheint hervorzugehen, dass der Aether des Raumes selbst stärker magnetisch ist, als die zu den diamagnetischen gezählten Körper.

367. Diamagnetische Polarität. Anfangs glaubte Faraday, dass sich diamagnetische Abstossung durch die Annahme erklären liesse, dass eine »diamagnetische Polarität« vorhanden wäre, das Umgekehrte der gewöhnlichen magnetischen Polarität. Nach dieser Auffassung, welche jedoch Faraday selbst später ganz fallen liess, induziert ein Magnet, dessen N-Pol dem Ende eines Wismutstabes genähert wird, in diesem Ende einen N-Pol (das Umgekehrte von dem, welchen er in einem Stabe von Eisen oder einem andern magnetischen Metall induzieren würde) und stösst denselben also ab. Weber adoptierte diese Auffassung und Tyndall war ein eifriger Verteidiger derselben, besonders nachdem er entdeckt hatte, dass die abstossende diamagnetische Kraft dem Quadrate der verwendeten magnetischen Kraft proportional ist; man hat sogar geglaubt, dass Ost- und Westpol eines diamagnetischen Stabes, welcher äquatorial in einem Kraftfelde liegt, verschiedene Eigenschaften besitzen. Die im vorhergehenden Paragraphen genannten Versuche legen jedoch eine Erklärung nahe, welche auf einfachere Weise mit den Thatsachen in Einklang gebracht werden kann. Es ist nachgewiesen (Art. 358), dass die Stärke, bis zu welcher die Magnetisierung in einem Medium vor sich geht, von der magnetischen Permeabilität dieses Mediums abhängt. Nun giebt die Permeabilität die Anzahl der magnetischen Linien an, welche in dem Medium für jede Linie der angewandten magnetisierenden Kraft induzirt werden. Eine bestimmte magnetisierende Kraft, angewandt auf einen lufterfüllten oder luftleeren Raum, würde eine bestimmte Anzahl magnetischer Linien in demselben induzieren. Wäre der betrachtete Raum mit einem paramagnetischen Körper erfüllt, so würde derselbe die magnetischen Linien in sich konzentrieren, wie die Kugel

in Fig. 177. Wäre jedoch die Permeabilität der Kugel kleiner als 1, so würden die magnetischen Linien das Bestreben haben, durch die Luft zu gehen (Fig. 178). Wäre der betrachtete Raum

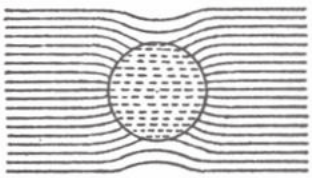


Fig. 177.

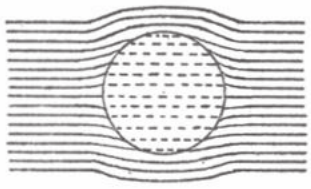


Fig. 178.

mit Wismut erfüllt, so würde die nämliche magnetisierende Kraft in dem Wismut *weniger* »Induktionslinien« erzeugen, als im leeren Raume. Doch würden die induzierten Linien noch in derselben allgemeinen *Richtung* verlaufen, wie im leeren Raume; nicht *in der entgegengesetzten Richtung*, wie Weber und Tyndall behaupten. Die Folge der Thatsache, dass in diamagnetischen Körpern eine schwächere Induktion stattfindet, lässt sich dadurch zur Anschauung bringen, dass diese Körper von dort, wo die magnetische Kraft stark ist, nach dort, wo dieselbe schwächer ist, getrieben werden. Aus diesem Grunde entfernt sich eine Wismutkugel von einem Magnet, und stellt sich ein kleiner Wismutstab zwischen den konischen Polen des Elektromagnets (Fig. 176) in die Aequatorlage, so dass seine Enden in Gegenden liegen, wo die magnetische Kraft schwächer ist. Man kann nicht zweifeln, dass in einem magnetischen Felde von *gleichmässiger* Stärke ein Wismutstab sich in die Richtung der Induktionslinien stellen würde.

368. Magneto-krystallische Wirkung. Im Jahre 1822 sprach Poisson den Satz aus, dass ein Körper mit krystallinischer Struktur in verschiedenen Richtungen auch verschiedene magnetische Kräfte haben würde, vorausgesetzt, dass er überhaupt magnetisch wäre; und im Jahre 1847 machte Plücker die Entdeckung, dass ein Stück Turmalin, welches an sich schwach paramagnetisch ist, sich wie ein diamagnetischer Körper verhielt, wenn es so aufgehängt wurde, dass die Achse des Krystalls horizontal war. Faraday wiederholte den Versuch mit

einem Krystall von Wismut und fand, dass derselbe das Bestreben hatte, sich mit seiner Krystallisationsachse in die Richtung der Linien des Feldes, in die Achsenlage zu stellen. Die magnetische Kraft, welche in dieser Weise auf Krystalle wirkte infolge ihrer Eigentümlichkeit, dass sie eine bestimmte Struktur haben, nannte er *magneto-krystallische Kraft.* Plücker versuchte, das magneto-krystallische Verhalten der Krystalle mit ihrem optischen Verhalten in Verbindung zu bringen, indem er folgendes Gesetz aufstellte: Es findet an den Polen eines Magnets entweder Abstossung oder Anziehung der optischen Achse statt (oder beider optischen Achsen, wenn die Krystalle zwei Achsen haben); und ist der Krystall negativ (d. h. optisch negativ, wo der zweite Brechungsexponent kleiner als der erste), so findet Abstossung, ist der Krystall positiv, so findet Anziehung statt. Tyndall hat versucht, die Unzulänglichkeit dieses Gesetzes nachzuweisen, da die paramagnetischen oder diamagnetischen Kräfte des Körpers dabei nicht als ein Ganzes in Rechnung gezogen würden. Er findet, dass die magneto-krystallische Achse der Körper im allgemeinen *eine Achse der grössten Dichte ist, und dass diese Achse sich in die Achsenlage stellt, wenn der Körper paramagnetisch, dagegen in die Aequatorlage, wenn der Körper diamagnetisch ist.* Bei solchen Körpern, welche wie Schiefer und viele Krystalle spaltbar sind, liegen die Spaltungsflächen gewöhnlich rechtwinklig zur magneto-krystallischen Achse. In anderer Weise lässt sich diese Thatsache auch so aussprechen: Bei nicht isotropischen Körpern verlaufen die induzierten magnetischen Linien nicht notwendigerweise in derselben Richtung wie die Linien des erzeugten magnetischen Feldes.

369. Diamagnetismus von Flammen. Im Jahre 1847 machte Bancalari die Entdeckung, dass Flammen von der Verbindungslinie der Pole eines Elektromagnets weggestossen werden. Faraday zeigte, dass alle Arten von Flammen, ebenso, wie aufsteigende Ströme von heisser Luft oder Rauch, vom Magnet beeinflusst werden, und das Bestreben haben, von dort, wo die magnetischen Kräfte stark sind, sich nach dort zu bewegen,

wo dieselben schwächer sind. Gase (mit Ausnahme von Sauerstoff und Ozon) und besonders heisse Gase sind schwach diamagnetisch. Aber die wirkliche Abstossung und das Ablenken der Flammen ist vielleicht zum Teil die Folge einer elektromagnetischen Kraft, ähnlich derjenigen, welche der Magnet auf den Konvektionsstrom des Volta'schen Bogens (Art. 443) und auf andere Konvektionsströme ausübt. Die elektrischen Eigenschaften der Flamme sind in Art. 8 und 309 erwähnt.

XXX. VORLESUNG: *Der magnetische Kreis.*

370. Magnetische Kreise. Es wird jetzt allgemein anerkannt, dass für magnetische Kreise ein ähnliches Gesetz existiert, wie es das Ohm'sche Gesetz für elektrische Ströme ist. Ritchie, Sturgeon, Joule und Faraday hatten bereits eine dunkle Vorstellung von diesem Gesetze, welches im Jahre 1873 durch Rowland eine handgreifliche Gestalt annahm. Letzterer berechnete die durch einen Stab gehenden magnetischen Linien, indem er die »magnetisierende Kraft der Spule« durch den »Widerstand gegen die Kraftlinien« des Eisens dividierte. Im Jahre 1882 führte Bosanquet den Ausdruck *magnetomotorische Kraft* ein und zeigte, wie sich die *Widerstände* der einzelnen Teile des magnetischen Stromes berechnen lassen und wie man durch Addition den gesamten *Widerstand* erhalten kann.

Das Gesetz des magnetischen Kreises lässt sich in folgender Weise aussprechen:

$$\text{Magnetische Flut} = \frac{\text{Magnetomotorische Kraft}}{\text{Widerstand}}$$

$$\text{oder } N = \frac{M}{Z}.$$

371. Widerstand. Ebenso wie man den elektrischen Widerstand eines prismatischen Konduktors aus seiner Länge, seinem Querschnitt und seiner Leitungsfähigkeit berechnen kann, ebenso lässt sich der magnetische Widerstand eines Eisenstabes aus seiner Länge, seinem Querschnitt und seiner Permeabilität

bestimmen. Der hauptsächlichste Unterschied zwischen beiden Fällen liegt in dem Umstande, dass bei der Elektrizität die Leitungsfähigkeit für schwache und starke Ströme dieselbe ist, während beim Magnetismus die Permeabilität nicht konstant ist; für grosse magnetische Fluten ist sie geringer als für kleine.

Es bezeichne nun l die Länge des Stabes in Zentimetern, A seinen Querschnitt in qcm, und μ seine Permeabilität; dann ist sein Widerstand der Länge l direkt, und A und μ umgekehrt proportional. Bezeichnen wir den Widerstand mit Z, so ist

$$Z = \frac{l}{A \cdot \mu}.$$

Beispiel. Ein Eisenstab von 100 cm Länge und 4 qcm Querschnitt wird derart magnetisiert, dass $\mu = 320$ ist. Dann ist $Z = 0{,}078$.

Der Widerstand eines magnetischen Kreises setzt sich im allgemeinen aus einer Anzahl von aufeinander folgenden Widerständen zusammen. Wir wollen zunächst den Fall eines geschlossenen magnetischen Stromkreises (Fig. 179) betrachten, bestehend aus einem gekrümmten Eisenkerne von der Länge l_1, dem Querschnitt A_1 und der Permeabilität μ_1; sowie aus einer Armatur von der Länge l_2, dem Querschnitt A_2 und der Permeabilität μ_2. Diese Armatur berühre die Enden des Eisenkernes. Dann ist der Widerstand:

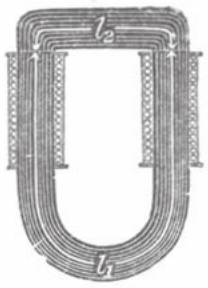


Fig. 179.

$$Z = \frac{l_1}{A_1 \mu_1} + \frac{l_2}{A_2 \mu_2}.$$

372. Berechnung der erregenden Kraft. Gehen wir nun zu dem schwierigeren Falle über, wo der Stromkreis teils aus Eisen, teils aus Luft gebildet wird. Wir wollen annehmen, dass die Armatur den Eisenkern nicht berühre, so dass sich in dem Kreise zwei Luftlücken befinden, jede von der Länge l_3 (vom Eisen zum Eisen gerechnet) und von dem Querschnitt A_3 (gleich dem Inhalt der Polfläche). Hierdurch kommt ein neuer Wider-

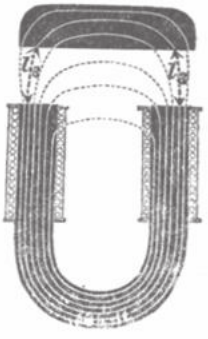


Fig. 180.

stand hinzu, welcher gleich $\frac{2\,l_3}{A_3}$ ist, da die Permeabilität für Luft = 1 ist (Fig. 180). Dies wird auch zur Folge haben, dass die magnetische Flut zum Teil vernichtet wird.

Nach Art. 336 ist die magnetomotorische Kraft $= \frac{4\pi C \,.\, S}{10}$, wenn die erregende Kraft aus C Ampère besteht, welche in S um den Eisenkern gehenden Spiralen zirkulieren. Wenden wir dies auf das vorige Beispiel an, indem wir die magnetomotorische Kraft durch den Widerstand dividieren, so erhalten wir für die magnetische Flut:

$$N = \frac{4\pi \,.\, CS}{10\left(\frac{l_1}{A_1\mu_1} + \frac{l_2}{A_2\mu_2} + \frac{2\,l_3}{A_3}\right)}.$$

In den meisten Fällen wird jedoch das Umgekehrte verlangt: zu berechnen, wieviel erregende Ampèrewindungen erforderlich sind, um eine bestimmte Flut durch einen magnetischen Stromkreis von gegebener Grösse zu erzeugen. Hierbei stösst man auf zwei Schwierigkeiten: die Permeabilität hängt von dem Sättigungsgrade ab und ferner giebt das teilweise Verschwinden der magnetischen Flut zu einem Fehler Anlass. Um die erste Schwierigkeit zu beseitigen, ist es nötig, Näherungswerte für μ zu finden. Nehmen wir z. B. an, dass in einem Eisenstabe von 80 qcm Querschnitt eine Flut von 1,000,000 Linien erzeugt werden soll, so ist B = 12,500 und aus der Tabelle des Art. 359 ergiebt sich, wenn der Stab Schmiedeeisen ist, für μ der ungefähre Wert 1247. Um die zweite Schwierigkeit zu beseitigen, müssen wir das Verschwinden versuchsweise schätzen. Wenn wir z. B. finden, dass von allen in dem U-förmigen Teile erzeugten Linien nur ein Teil $\frac{1}{\nu}$ durch die Armatur geht, so müssen wir, um N Linien durch diese hindurchgehen zu lassen, $\nu \,.\, N$ Linien in dem U-förmigen Teile erzeugen, wo der Koeffizient ν ein uneigentlicher Bruch ist, der mit der Grösse der Lücken zunimmt.

Wir können daher in folgender Weise rechnen: Ampère-Windungen, welche erforderlich sind, um N Linien durch das Eisen der Armatur zu führen: $N \cdot \frac{l_1}{A_1 \mu_1} : 1{,}257$; Ampère-Windungen, welche erforderlich sind, um N Linien durch die beiden Lücken zu führen: $N \cdot \frac{2\, l_3}{A_3} : 1{,}257$; Ampère-Windungen, welche nötig sind, um νN Linien durch das Eisen des Magnets zu führen:

$$\nu N \cdot \frac{l_2}{A_2 \mu_2} : 1{,}257.$$

Durch Addition ergiebt sich hieraus:

Summe der erforderlichen Ampère-Windungen:

$$= N \left(\frac{l_1}{A_1 \mu_1} + \frac{\nu l_2}{A_2 \mu_2} + \frac{2 l_3}{A_3} \right) : 1{,}257.$$

Aehnliche Formeln benutzten Hopkinson und Kapp bei der Konstruktion von Elektromagneten für Dynamomaschinen.

373. Wirkung der Luftlücke im Stromkreise. Da die Luft keine Remanenz besitzt, so hat eine Lücke im eisernen Stromkreise zur Folge, dass der Residualmagnetismus unbeständig wird, als wenn der Magnetismus an den Polflächen eine selbst entmagnetisierende Wirkung hätte. In der That ist es sehr schwierig, kurzen Metallstücken permanenten Magnetismus zu erteilen. Ferner erfordert die geringe Permeabilität der Luft ungeheure magnetomotorische Kräfte, zur Erzeugung einer bestimmten Flut, im Vergleich zu den Kräften, welche beim Eisen erforderlich sind. Der Erfolg ist der, dass die Magnetisierungskurven sich stärker nach rechts biegen, da zur Erreichung eines bestimmten Wertes von B ein grösseres H erforderlich ist. Das Vorhandensein von Verbindungsstellen in dem magnetischen Stromkreise hat eine ähnliche Wirkung.

Der Grund, weshalb die vom Elektromagneten auf die Armatur ausgeübte Anziehung so schnell abnimmt, wenn die Armatur nur um eine kurze Strecke entfernt wird, ist der, dass der grosse Widerstand der Luftlücke, welche auf diese Weise in den Stromkreis eingeführt wird, die magnetische Flut vermindert.

374. Allgemeines Gesetz elektromagnetischer Systeme. Wir wollen jetzt ein elektromagnetisches System betrachten, welches aus einer beliebigen Anzahl einzelner Teile bestehen möge — aus Eisenmassen, stromführenden Spulen, Luft, andern Körpern, sowohl magnetischen als auch diamagnetischen — alles in bestimmter Aufeinanderfolge. Jeder Wechsel in der Anordnung der Teile wird im allgemeinen entweder eine Zunahme oder Abnahme der magnetischen Flut zur Folge haben. Wird z. B. die Armatur eines Elektromagnets nach den Polen hin bewegt, oder dreht sich die Nadel eines Galvanometers, so tritt eine Verbesserung des magnetischen Stromkreises ein, und die magnetische Flut durch die Spulen nimmt zu. Magnetische Kreise haben stets das Bestreben, sich möglichst dicht an einander zu stellen. Wenn wir dagegen die Armatur von einem Elektromagnet entfernen, so wird der magnetische Widerstand grösser und die Flut nimmt ab; hiergegen wirkt die Reaktion des Systems. Alles dies lässt sich in folgendes allgemeine Gesetz zusammenfassen: *Jedes elektromagnetische System ist bestrebt, die Anordnung seiner Teile derart zu ändern, dass die magnetische Flut ein Maximum wird.*

Angenommen, die äussern magnetisierenden Kräfte blieben dieselben, und eine Verschiebung dx irgend eines Teiles hätte eine Flutabnahme dN zur Folge, dann ist die Kraft, welche dieser Verschiebung widerstrebt, proportional zu $\frac{dN}{dx}$.

375. Gesetz des Elektromagnets. Bevor man das Gesetz des magnetischen Stromkreises erkannt hatte, war man vielfach bemüht, algebraische Formeln zu finden, welche das Verhältnis der Stromstärke zu dem Betrage des erzeugten Magnetismus angeben sollten. Lenz und Jacobi behaupteten, dass *der Magnetismus eines Elektromagnets proportional sei dem Strome und der Anzahl der Drahtwindungen der Spule*, oder mit andern Worten, proportional den Ampère-Windungen, d. h.

$$m = a \,.\, C \,.\, S$$

wo a eine Konstante ist, welche von der Quantität, Qualität

und Gestalt des Eisens abhängt. Diese Regel ist jedoch nur dann richtig, wenn der Eisenkern noch weit vom Sättigungspunkte entfernt ist. Wenn das Eisen bereits stark magnetisiert ist, so wird der Magnetismus durch Verdoppelung der Stromstärke nicht verdoppelt, wie Joule im Jahre 1847 nachwies.

Müller gab folgende Näherungsregel: *die Stärke eines Elektromagnets ist dem Winkel proportional, dessen Tangente gleich der Stärke des magnetisierenden Stromes ist*, d. h.

$$m = A \,.\, \text{arc} \,.\, \tan C$$

wo C der magnetisierende Strom und A eine Konstante ist, die von der Konstruktion des betreffenden Magnets abhängt. Stellen wir uns vor, dass die Abschnitte der horizontalen Linie OT (Fig. 114) Stromstärken und die Anzahl Bogengrade, welche von den schrägen Linien begränzt werden, die Stärken des Magnetismus darstellen, so sehen wir leicht ein, dass der Winkel nie grösser als 90° werden kann, selbst wenn die Linie OT unendlich lang wird.

Eine andere Formel, die Frölich'sche, lautet

$$m = a \,.\, \frac{C}{1 + b \,.\, C}$$

wo a und b Konstanten bedeuten, welche von der Gestalt, Qualität und Quantität des Eisens abhängen, sowie von der Konstruktion der Spule. Die Konstante b ist der reciproke Wert derjenigen Anzahl von Ampère, welche m gleich der Hälfte des möglichen Maximums des Magnetismus machen würde.

Des Verfassers Abweichung von dieser Formel drückt die Anzahl N der magnetischen Linien aus, welche vom Pole des Elektromagnets ausgehen:

$$N = Y \,.\, \frac{C}{C + C'}.$$

Hierin bedeutet Y die Maximalzahl der magnetischen Linien, welche vorhanden sein würden, wenn der magnetisierende Strom unendlich verstärkt und der Eisenkern gesättigt würde, C' bedeutet diejenige Anzahl Ampère, welche den Magnetismus bis zur halben Sättigung bringen würden.

Keine dieser empirischen Formeln ist so brauchbar, wie die Formel am Ende des Art. 372.

XXXI. VORLESUNG: *Elektromagnete.*

376. Elektromagnete. Unmittelbar nach Oersted's Entdeckung der Wirkung des elektrischen Stromes auf eine Magnetnadel, fanden im Jahre 1820 Arago und Davy unabhängig von einander eine Methode, Eisen und Stahl dadurch zu magnetisieren, dass man elektrische Ströme in spiralförmig um dieselben gewundenen Drahtrollen fliessen lässt. Diese Methode

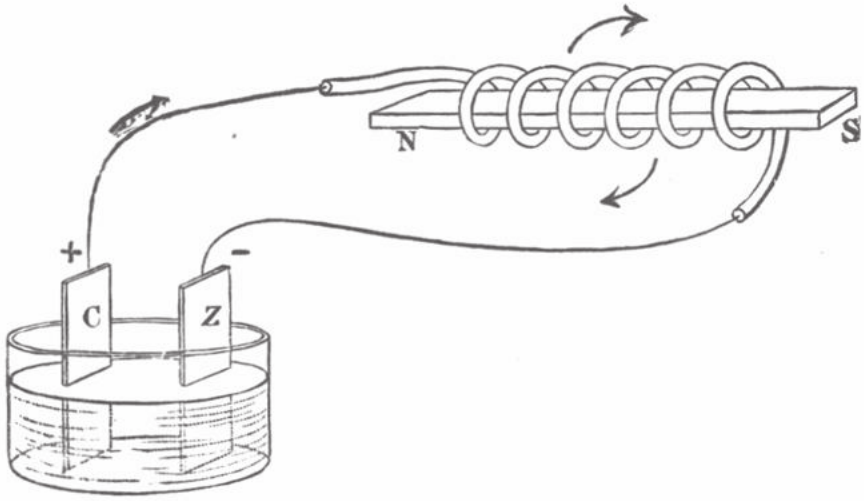


Fig. 181.

wird durch Fig. 181 veranschaulicht, wo der Strom eines einfachen Elementes durch eine spiralförmig gewundene Rolle von isoliertem Kupferdrahte fliesst, in deren Hohlraume sich ein Eisen- oder Stahlstab befindet, welcher hierdurch magnetisiert wird. Diese einzelnen Windungen der Rolle dürfen einander und den von ihnen umgebenen Stab nicht berühren, denn sonst würde der Strom den kürzesten der ihm gebotenen Wege nehmen und nicht alle Windungen der Rolle durchkreisen. Um diesen durch Berührung veranlassten kurzen Weg des Stromes zu verhüten, muss der Draht der Rolle mit Seide oder Baumwolle übersponnen (im letzteren Falle wird die Isolierung dadurch noch vollständiger, dass man die Baumwolle in geschmolzenes Paraffin taucht) oder auch mit einer Schicht Guttapercha über-

zogen werden. Ist der Stab von Eisen, so ist derselbe nur so lange Magnet, als der Strom fliesst; und ein Eisenstab, welcher auf diese Weise von einer Drahtrolle umgeben ist, um denselben durch einen elektrischen Strom zu magnetisieren, heisst ein **Elektromagnet.** Diese Bezeichnung rührt von Sturgeon her, welcher die Entdeckungs Davy's und Arago's zur Anfertigung von Elektromagneten benutzte, welche viel kräftiger waren als alle bislang verfertigten Magnete.

Sein erster Elektromagnet war ein Hufeisen (Fig. 182) bestehend aus einem ungefähr 1 Fuss langen und $\frac{1}{2}$ Zoll dicken Eisenstabe, der mit einem einfachen starken Kupferdrahte von nur 18 Windungen umsponnen war. Bei Anwendung eines Stromes eines einzelnen Elements betrug die Tragkraft 9 Pfund, dagegen 50 Pfund bei Verwendung einer stärkern Batterie. Sollen Elektromagnete am entfernten Ende einer langen Linie arbeiten, so muss man dieselben, wie Henry zuerst nachwies, mit zahlreichen Windungen eines dünnen Drahtes umgeben. Der grosse Nutzen des Elektromagnets bei elektrischen Glocken und telegraphischen Apparaten basiert auf der Thatsache, dass *sein Magnetismus unter der Kontrolle des Stromes steht.* Wird der Strom geschlossen, so wird er ein Magnet; wird der Strom unterbrochen, so hört er auf als Magnet zu wirken. Ausserdem lässt sich derselbe aus der Entfernung kontrollieren, indem der Strom an einem entfernten Punkte des Stromkreises durch einen geeigneten Schlüssel geschlossen oder unterbrochen wird.

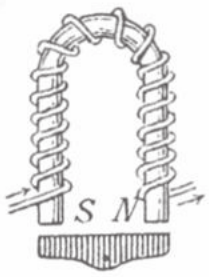


Fig. 182.

377. Polarität und Stromrichtung. Mit Hilfe der Ampère'schen Regel (Art. 192) können wir bestimmen, welches Ende eines Elektromagnets der nordsuchende Pol sein wird; denn denken wir unseren eigenen Körper im Strome schwimmen (Fig. 181), mit dem Gesichte nach dem Stabe gerichtet, so befindet sich der nordsuchende Pol zur Linken. Es ist gut, sich diese Lage an folgenden Regeln zu merken: — *Sieht man auf den südsuchenden Pol eines Elektromagnets, so zirkulieren die magnetisierenden Ströme in derselben Richtung, wie sich die Zeiger einer*

Uhr bewegen; und sieht man auf den nordsuchenden Pol eines Elektromagnets, so zirkulieren die magnetisierenden Ströme in der entgegengesetzten Richtung der Bewegung eines Uhrzeigers. Fig. 183 macht dies anschaulich. Diese Regeln gelten stets, gleichviel ob die Drahtwindungen bei dem dem Beobachter zugewandten oder abgewandten Ende anfangen, d. h. gleichviel, ob die Spirale rechts oder, wie in Fig. 181, links gewunden ist. In anbetracht der magnetisierenden Kraft ist es ganz egal, ob die Windungen der Rolle an dem einen Ende anfangen und nach dem andern führen und zum Ausgangspunkte wieder zurück, oder ob sie in der Mitte des Stabes anfangen und von dort zu dem einen Ende desselben führen und dann zum andern; man muss nur wissen, in welcher Richtung der Strom um den Stab fliesst, wenn man der Axe desselben entlang sieht. Die Korkzieherregel (Art. 193) führt zu demselben Resultate.

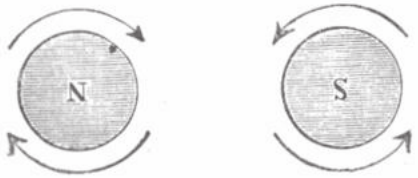


Fig. 183.

Angenommen, ein Eisenkern wäre mit einer rechts gewundenen Spule umgeben und es trete an irgend einer Stelle ein Strom ein, der nach beiden Seiten fliesst, so treten entgegengesetzt gerichtete magnetisierende Wirkungen an den beiden gegenüberliegenden Stellen auf und es entstehen an der Eintrittsstelle Folgepole (Art. 120). Fig. 184 zeigt einen eisernen Ring mit einer rechts gewundenen geschlossenen Spule. Wir haben dann einen doppelten S-Pol an der Stelle, wo der Strom eintritt und einen doppelten N-Pol an der Stelle, wo der Strom aus den Windungen austritt.

Fig. 184.

378. Anfertigung von Elektromagneten. Die brauchbarste Form eines Elektromagnets ist diejenige, wo der Eisenkern hufeisenförmig gebogen ist, so dass beide Pole auf dieselbe Eisenarmatur wirken können. In diesem Falle teilt man die Rollen gewöhnlich in zwei auf Spulen gewundene Teile, Fig. 185. Der in Fig. 186 abgebildete Elektromagnet hat eine für Versuche

im Laboratorium geeignete Form, und hat bewegliche Rollen, welche über die Eisenkerne gestülpt werden. Letztere sind unten durch ein starkes eisernes Joch mit einander verbunden. Eine besondere von Ruhmkorff angegebene Form eines Elektromagnets zu Versuchen über Diamagnetismus ist in Fig. 176 abgebildet.

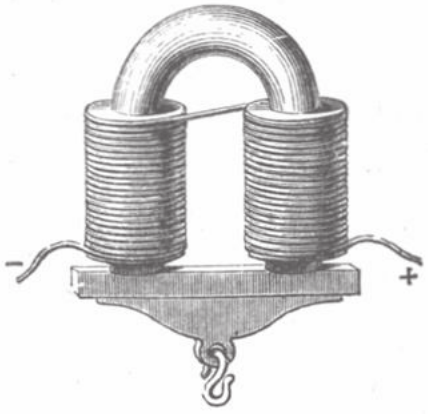


Fig. 185.

Man hat viele besondere Formen [1]) des Elektromagnets für besondere Zwecke erfunden. Um eine sehr kräftige Anziehung bei sehr kurzen Entfernungen zu erzielen, benutzt man am besten einen kurzen, cylindrischen Elektromagnet, der von einer

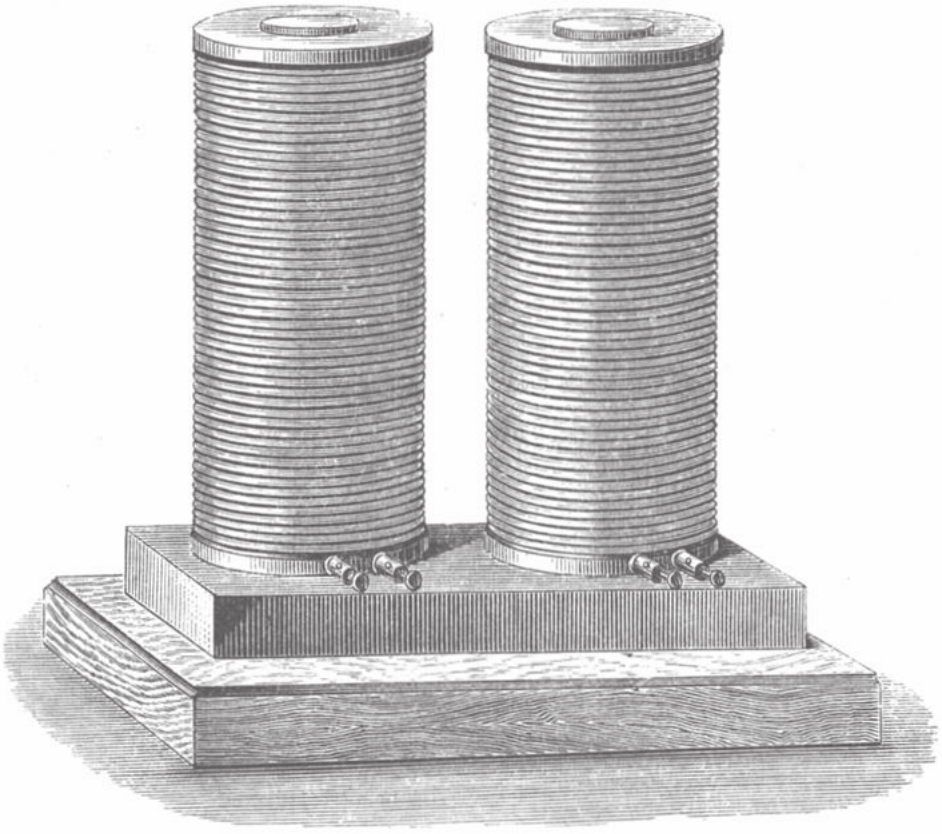


Fig. 186.

äussern eisernen Röhre umgeben ist, die unten mit dem Eisenkerne durch Eisen verbunden ist, denn der eiserne Mantel bietet den

1) Bezüglich der Beschreibung derselben verweisen wir auf des Verfassers Lehrbuch: Der Elektromagnet und der elektromagnetische Mechanismus.

magnetischen Linien einen Rückweg. Diese Form ist unter der Bezeichnung *eisenbekleideter* Magnet bekannt. Um Eisen durch eine weite, grossen Widerstand bietende Lücke hindurch anzuziehen, ist ein hufeisenförmiger Magnet mit langen Kernen zu wählen, damit man hinreichend Draht um dieselben wickeln kann und so eine genügende erregende Kraft erhält, welche die Flut durch die Lücke zu führen vermag. Um eine sanfte Anziehung längs einer langen Strecke zu erhalten, verwendet man ein Solenoid (Art. 380), eine lange röhrenförmige Spule mit langem, beweglichem Eisenkern. Will man einen sehr schnell wirkenden Magnet haben, so darf man die Spulen nicht um den ganzen Eisenkern, sondern nur um die Polflächen legen. Als Regel merke man, dass die Eisenteile, einschliesslich des Jochs und der Armatur, möglichst einen geschlossenen magnetischen Kreis bilden müssen. Der Querschnitt des Joches soll grösser als der des Eisenkerns sein.

379. Tragkraft von Elektromagneten. Die Tragkraft eines Elektromagnets hängt nicht allein von seiner »magnetischen Stärke«, sondern auch von seiner Gestalt ab, sowie von der Form seiner Pole und der Gestalt der weichen Eisenarmatur, welche von ihm angezogen wird. Dieselbe sollte so angebracht sein, dass möglichst viele Kraftlinien durch die Armatur führen, und die Armatur selbst sollte eine genügende Masse von Eisen enthalten. Joule konstruierte einen kräftigen Elektromagnet, der mehr als 1000 Kilo zu tragen vermochte. Die Maximal-Anziehung, die er zwischen einem Elektromagnet und seiner Armatur erzeugen konnte, betrug 200 Pfund pro Quadratzoll oder circa 13,800,000 Dyn pro Quadratzentimeter. Bidwell fand, dass die Anziehung auf 226,3 Pfund pro Quadratzoll stieg, wenn das Schmiedeeisen bis zu 19,820 magnetischen Linien pro Quadratzentimeter gesättigt war. Das Anziehungsgesetz lautet: Die Anziehung pro Quadratzentimeter ist dem Quadrate der Anzahl der Linien pro Quadratzentimeter proportional, d. h.

$$P = \frac{B^2 A}{8\pi}.$$

Hier bedeutet P die Anziehung in Dyn und A die Fläche in qcm. Die folgende Tabelle enthält die Werte der anziehenden Kraft für verschiedene Magnetisierungsstufen.

BLinien pro qcm	Dyn pro qcm	Gramm pro qcm
1000	39,790	40,56
2000	159,200	162,3
3000	358,100	365,1
4000	636,600	648,9
5000	994,700	1014
6000	1,432,000	1460
7000	1,950,000	1987
8000	2,547,000	2596
9000	3,223,000	3286
10,000	3,979,000	4056
12,000	5,730,000	5841
14,000	7,800,000	7950
16,000	10,170,000	10390
18,000	12,890,000	13140
20,000	15,920,000	16230

Man bemerkt, dass bei Verdoppelung von B die anziehende Kraft 4mal grösser wird. Eine merkwürdige Folge dieses Gesetzes ist die, dass die anziehende Kraft eines Elektromagnets oder Magnets um so schwächer ist, je grösser seine Pole sind. Mitunter — z. B. bei Stabmagneten — wird ihre anziehende Kraft dadurch vergrössert, dass man die Pole derart abrundet, dass eine Konzentration von B stattfindet.

380. Solenoid. Eine spiralförmig gewundene Drahtrolle, durch welche ein Strom fliesst, wirkt auch dann noch als Magnet, wenn dieselbe keinen Eisenstab oder Stahlstab umgiebt. (In diesem Falle allerdings nicht so kräftig, als wenn sich in derselben ein Eisenkern befindet.) Solche Spirale wird bisweilen **Solenoid** genannt. Ein Solenoid hat zwei Pole und eine neutrale Aequator-Gegend. Ampère fand, dass die Spirale Magnete an-

zieht und selbst von solchen angezogen wird. Auch wirkt sie anziehend auf eine zweite Spirale und hat ein magnetisches Feld, welches im allgemeinen mit demjenigen eines Stabmagnets Aehnlichkeit hat. Wird die Spirale so gestellt, dass sie sich um eine vertikale Achse drehen kann, so stellt sie sich in die Richtung von Nord nach Süd, längs des magnetischen Meridians.

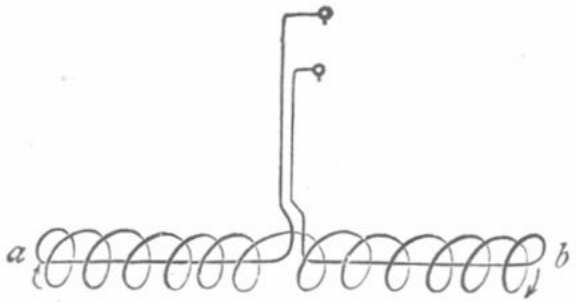


Fig. 187.

Fig. 187 zeigt ein Solenoid, welches mit Spitzen versehen ist, mittelst deren sich dasselbe an einem Gestell aufhängen lässt (vgl. Fig. 192).

Mit Eisenkern wirkt das Solenoid weit kräftiger. Infolge seiner grössern Permeabilität besitzt der Eisenkern die Fähigkeit, die Zahl der magnetischen Linien zu vervielfachen und an festen Polen zu vereinigen. Wir wissen bereits (Art. 197), dass die Kraftlinien, welche von einem in einem Drahte fliessenden Strome herrühren, geschlossene Kurven sind, und fast die Gestalt von um den Draht führenden Kreisen haben (Fig. 108 und 189). Wäre kein Eisenkern vorhanden, so würden viele dieser kleinen kreisförmigen Kraftlinien einfach als kleine geschlossene Kurven um ihren eigenen Draht verlaufen; da aber die Permeabilität des Eisens mehrere hundertmal grösser ist als die der Luft, so ändern die magnetischen Linien überall da, wo der Draht nahe am Eisenkerne vorbeiführt, ihre Gestalt, und aus den kleinen Kreisen rings um die einzelnen Drahtwindungen werden Kurven, welche durch den Eisenkern vom einen Ende zum andern laufen und ausserhalb im Bogen von dem einen Ende der Spule zum andern zurückführen. Einige *wenige* der magnetischen Linien thun dies auch, wenn kein Eisen vorhanden ist; sie thun es fast alle, wenn Eisen vorhanden ist[1]).

1) Bei einem permanenten Hufeisenmagnet von Stahl wird jedoch die Gesamtzahl der durch die Biegung des U führenden Linien *nicht vermehrt*, wenn man den Eisenanker anlegt, obgleich derselbe die Linien an den Polen konzentriert.

Daher hat der Elektromagnet mit Eisenkern viel stärkere Pole als die Spirale des Leitungsdrahtes allein.

In Art. 337 wurde gezeigt, dass die Intensität des magnetischen Feldes in der Mitte eines Solenoids von der Länge l, dessen S Spiralen CAmpère führen, den Wert hat

$$H = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{C \cdot S}{l}.$$

Da die eingeschlossene Fläche $= r^2\pi$, so ist die Flut des Solenoids (ohne Eisen)

$$N = \frac{4\pi^2 r^2}{10\,l} \cdot CS.$$

Und da 4π magnetische Linien auf eine magnetische Einheit gehen, so wirkt das Solenoid (ohne Eisen) so, als wenn es an seinem Pole den Magnetismus

$$m = \frac{\pi r^2}{10\,l} \cdot CS$$

hätte.

Man beachte, dass für jedes Solenoid von gegebener Länge und gegebenem Radius die drei magnetischen Grössen H (inneres Feld), N (magnetische Flut) und m (Polstärke) proportional sind den *Ampère* des Stromes und der Anzahl der *Windungen* der Spule. Das Produkt, welches auf diese Weise bei allen elektromagnetischen Formeln auftritt, heisst die Anzahl der *Ampère-Windungen.* Ein Solenoid mit einem beweglichen Eisenkern wird bisweilen ein *Saugmagnet* genannt. Der Eisenkern ist bestrebt, diejenige Lage einzunehmen, in welcher er am besten den magnetischen Kreis vervollständigt (Art. 374). Ist der Eisenkern bedeutend länger als die Rolle, so wächst die Anziehung, wenn das Ende des Eisenkerns in die Spule eindringt, und nimmt schnell ab, wenn derselbe austritt. Kurze Eisenkerne werden nur so lange angezogen, wie sie sich an der Mündung der Spule befinden, denn das Maximum der Anziehung tritt ein, wenn sie ungefähr mit der halben Länge in die Spule eingetreten sind.

381. Die Windungen der Elektromagnete. Die genauen Gesetze bezüglich der Windungen der Elektromagnete

sind ziemlich kompliziert; doch lassen sich ohne Schwierigkeit bestimmte Regeln aufstellen, welche näherungsweise richtig sind. Bei jedem Elektromagnet lassen sich dieselben allgemeinen Thatsachen beobachten; je stärker die erregende Kraft, desto mehr Magnetismus wird erzeugt, und bei Anwendung einer sehr grossen erregenden Kraft wird das Eisen thatsächlich gesättigt und nimmt nur noch wenig Magnetismus in sich auf. Es ergiebt sich ohne Weiteres, dass, wenn der Elektromagnet am Ende einer langen Linie gebraucht werden soll, durch welche nur ein schwacher Strom fliesst (etwa nur 0,01 Ampère), die zur Hervorbringung des Magnetismus erforderliche Anzahl von Ampère-Windungen nur bei Anwendung einer grossen Zahl von Drahtwindungen erreicht wird und dass sich ein dünner Draht verwenden lässt, da der Strom schwach ist.

Wenn Elektromagnete mit vielen Windungen aus dünnem Drahte umgeben werden, so vergrössern diese Spulen den elektrischen Widerstand des Stromkreises und schwächen dadurch den Strom. Dies erschwert die Konstruktion telegraphischer und anderer Instrumente. Denn während Elektromagnete mit »langen Spiralen«, welche aus vielen feinen Drahtwindungen bestehen, bei langen Schliessungsbögen mit grossem Widerstande gebraucht werden müssen, würden wir einen solchen Apparat bei einem Schliessungsbogen von sehr geringem Widerstande nicht gebrauchen können, denn der Widerstand einer langen dünnen Spirale würde unverhältnismässig gross sein; in diesem Falle wäre eine kurze Spirale mit wenigen Windungen aus starkem Draht erforderlich (vergl. Art. 187).

Die Beschaffenheit der *Linie* (je nachdem dieselbe einen grossen oder kleinen Widerstand hat) entscheidet darüber, wie die Spirale gewunden und wie die Batterie angeordnet werden muss.

Aehnliche Elektromagnete von verschiedener Grösse erfordern Ampère-Windungen, die ihren linearen Dimensionen proportional sind, sollen dieselben auf denselben Grad der Sättigung gebracht werden.

Da der Magnetismus des Magnets von der Anzahl der Am-

père-Windungen abhängt, so sollte man erwarten, dass es gleichgültig wäre, ob die Rollen dicker als der Eisenkern sind oder ob sie denselben dicht einschliessen. Falls keine magnetische Entweichung stattfände, so wäre dies in gewissem Sinne auch richtig; doch sind bei einer gleichen Zahl von Windungen grosse Rollen kostspieliger und bieten einen höhern Widerstand. Deshalb werden die Rollen so dicht um den Eisenkern gewunden, wie es mit einer guten Isolation verträglich ist. Auch wird der Eisenkern möglichst dick und von grösstmöglicher Permeabilität gewählt, von der Gestalt, dass ein möglichst kompakter magnetischer Kreis vorhanden ist, so dass der magnetische Widerstand so viel wie möglich reduziert wird und bei einer bestimmten Anzahl von erregenden Ampère-Windungen eine möglichst grosse magnetische Menge resultiert. Aus diesem Grunde sind Elektromagnete von Hufeisenform kräftiger als gerade Elektromagnete gleichen Gewichts, und eben deshalb trägt ein Pol eines hufeisenförmigen Elektromagnets nur ungefähr den vierten Teil der Last, welche beide Pole tragen.

Da die Rollen des Elektromagnets sich durch den Strom erwärmen, so muss eine genügende abkühlende Oberfläche vorhanden sein, falls die Isolation der Windungen nicht verkohlen soll. Jeder qcm Oberfläche, der 1° C über die Temperatur der umgebenden Luft erwärmt wird, kann ungefähr 0,0029 Watt abgeben. Nimmt man eine Temperaturerhöhung von 50° gegenüber der umgebenden Luft als Sicherheitsgrenze an, so ist der stärkste Strom, welcher hindurchgeschickt werden darf, $0{,}38 \cdot \sqrt{\frac{s}{r}}$ Ampère, wo r den Widerstand des Elektromagnets und s die Oberfläche in qcm bedeutet.

382. Polarisierter Mechanismus. Ein Elektromagnet bewegt seine Armatur nur in einer Richtung, gleichviel in welcher Richtung der Strom fliesst. Eine Umkehrung des Stromes hat hierauf keinen Einfluss. Es lässt sich jedoch in zweifacher Weise ein Mechanismus anbringen, so dass die Armatur nach Belieben in dieser oder der entgegengesetzten Richtung bewegt

wird. 1) Die Bewegung der Armatur wird durch eine regulierte Feder in der Weise kontrolliert, dass dieselbe eine mittlere Stellung einnimmt, wenn ein schwacher Strom fliesst, und dass dieselbe sich dem Elektromagnet nähert oder von ihm entfernt, je nachdem der Strom verstärkt oder geschwächt, resp. unterbrochen wird. 2) Eine *polarisierte* Armatur (d. h. eine solche, welche durch einen besondern Strom magnetisiert wird) wird nicht vor, sondern *zwischen die Pole* des Elektromagnets gebracht. Die Richtung, nach welcher sich dieselbe zu bewegen strebt, kehrt sich um, wenn der Strom im Schliessungskreise des Elektromagnets umgekehrt wird.

383. Wachsen des Magnetismus. Um einen Eisenkern zu magnetisieren, ist Zeit erforderlich. Dies ist hauptsächlich eine Folge der Thatsache, dass ein Strom, welcher zu fliessen beginnt, nicht sofort seine volle Stärke erreicht, da er durch die selbstinduzierte gegenelektromotorische Kraft verzögert wird (Art. 453); teilweise rührt dies auch von dem Auftreten vorübergehender umgekehrter Wirbelströme her (Art. 452), die in dem Eisen selbst induziert werden. Faraday's grosser Elektromagnet in der Royal Institution verlangt circa 2 Sekunden, bevor er seine Maximalstärke erreicht. Die Elektromagnete grosser Dynamomaschinen gebrauchen oft 10 Minuten oder noch mehr, bevor sie die zur Abeit erforderliche Stufe der Magnetisierung erreichen.

Benutzt man Elektromagnete mit schnell auf einander folgenden Wechselströmen (Art. 465), so treten verschiedene andere Erscheinungen ein, bezüglich welcher wir den Leser auf Art. 472 verweisen.

XXXII. VORLESUNG: *Elektrodynamik.*

384. Elektrodynamik. Im Jahre 1821, fast unmittelbar nach Oerstedt's Entdeckung von der Einwirkung eines Stromes auf einen Magnet, machte Ampère die weitere Entdeckung, dass ein Strom auf einen zweiten Strom wirkt, indem er denselben

nach bestimmten feststehenden Gesetzen anzieht oder abstösst [1]). Diese Wirkungen untersuchte er experimentell, und aus den Versuchen leitete er eine Theorie der Kraft ab, welche ein Strom auf einen zweiten ausübt. Denjenigen Teil der Wissenschaft, welcher von der Kraft handelt, die ein Strom auf einen zweiten ausübt, nannte er **Elektrodynamik**. Man weiss jetzt, dass diese Wirkungen von rein magnetischer Art sind und von Spannungen in dem dazwischen befindlichen Medium herrühren. Das magnetische Feld um einen einzeln Konduktor besteht aus einem magnetischen Wirbel (Art. 197), der auf jeden andern stromführenden Konduktor einwirkt, welcher in das Feld des ersten gebracht wird. Fig. 188 stellt das Feld dar, welches von zwei parallelen geraden Konduktoren herrührt, welche durch eine mit Eisen-

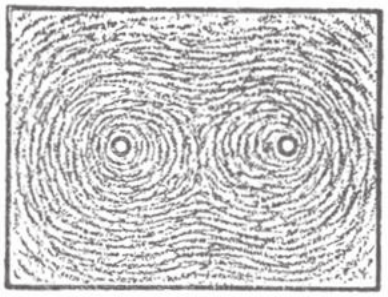


Fig. 188.

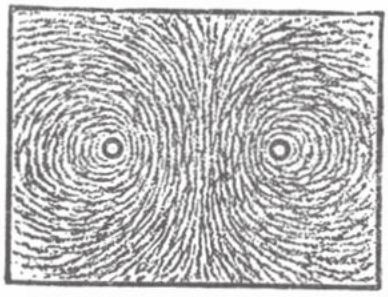


Fig. 189.

feilspänen besiebte Glasplatte hindurchgehen. Es fliessen hier die Ströme in derselben Richtung, während sie bei Fig. 189 entgegengesetzte Richtung haben. Im ersten Falle haben die Spannungen im Felde (Art. 119) das Bestreben, sie zusammen zu ziehen, im zweiten Falle, sie von einander zu entfernen [2]).

385. Gesetze über parallele und sich kreuzende Ströme. Ampère entdeckte folgende Gesetze:

1) *Zwei parallel gerichtete Teile eines Stromleiters ziehen einander an, wenn der Strom in den Leitungsdrähten nach derselben Richtung fliesst; und stossen einander ab, wenn die Ströme in entgegengesetzten Richtungen fliessen.*

1) Richtiger würde man sich ausdrücken, wenn man sagt, dass die Kraft auf stromleitende Konduktoren wirkt, statt auf die Ströme selbst.

2) Vergl. Philosophical Magazine, November 1878, p. 348.

Dieses Gesetz ist giltig, gleichviel ob die parallelen Drähte Teile von zwei verschiedenen Stromleitern oder Teile desselben Stromleiters sind. Die einzelnen Windungen einer Spirale, wie Fig. 187, ziehen sich z. B. an, wenn dieselben von einem Strome durchflossen werden; eine solche Spirale verkürzt sich daher, wenn durch dieselbe ein Strom geschickt wird. Dies findet jedoch eine ebenso gute Erklärung durch das allgemeine Gesetz elektromagnetischer Systeme (Art. 374), weil eine Verkürzung den Widerstand des magnetischen Kreises verringert und die Flut vergrössert.

2) *Zwei Stromleiter, welche sich unter einem Winkel kreuzen, ziehen einander an, wenn entweder beide Ströme nach dem Kreuzungspunkte oder beide von ihm fortfliessen, und stossen einander ab, wenn der eine nach jenem Punkte und der andere von demselben fortfliesst.*

In Fig. 190 haben wir demnach 3 Fälle der Anziehung und 2 Fälle der Abstossung.

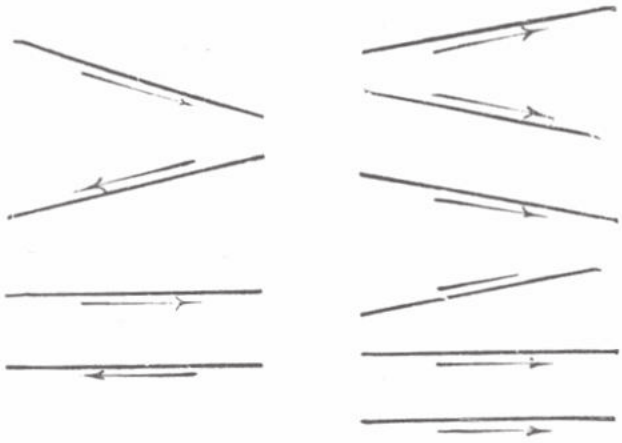


Fig. 190.

3) *Wenn ein Element eines Stromleiters eine Kraft auf ein anderes Element eines Stromleiters ausübt, so strebt jene Kraft stets das letztere rechtwinklig zu ihrer eigenen Richtung zu stellen.* Im Falle zweier parallelen Stromleiter wirkt z. B. die anziehende oder abstossende Kraft rechtwinklig zu den Strömen selbst.

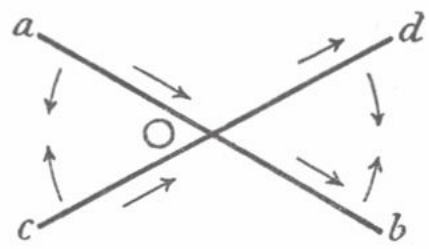


Fig. 191.

Ein Beispiel für das zweite und dritte Gesetz zeigt Fig. 191. Hier sind zwei Ströme *ab* und *cd* um den Mittelpunkt O beweglich. Zwischen *a* und *d* findet *Abstossung* statt, ebenso zwischen *b* und *c*, während in den beiden andern Quadranten *Anziehung* stattfindet, zwischen *a* und *c* und zwischen *b* und *d*.

Die vorstehenden Gesetze lassen sich zu einem zusammenfassen: Welche Lage auch 2 Stromleiter haben mögen, sie sind stets bestrebt sich so zu stellen, dass ihre Ströme möglichst nahe denselben Weg fliessen.

4) *Die Kraft, welche 2 parallele Stromleiter auf einander ausüben, ist dem Produkte der Stromstärken und der Länge der Stromleiter direkt, ihrem Abstande umgekehrt proportional.*

386. Ampère's Gestell. Um diese Anziehungen und Abstossungen beobachten zu können, konstruierte Ampère den nach ihm benannten, in Fig. 192 abgebildeten Apparat, das

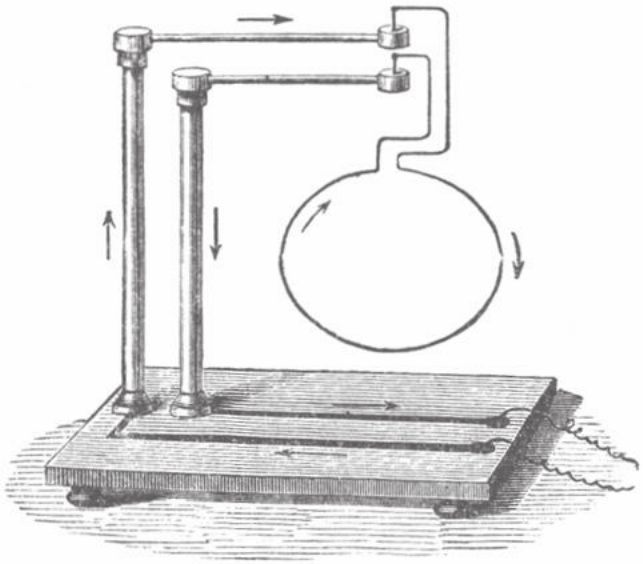


Fig. 192.

Ampère'sche Gestell, welches aus zwei aufrechten Stützen besteht, an denen man Konduktoren, welche aus Draht verfertigt und verschieden gestaltet sind, derart aufhängen kann, dass dieselben rotieren können. Die Enden der Drähte des beweglichen Teiles tauchen in 2 Quecksilbernäpfe, wodurch für gute Berührung gesorgt ist, während sie sich frei bewegen können.

Mit Hilfe dieses Apparates bewies Ampère noch die folgenden Sätze:

a) Ein Stromleiter, welcher so gebogen ist, dass der Strom auf zwei dicht neben einander liegenden Wegen hin- und zurückfliesst, übt auf äussere Punkte keine Kraft aus.

b) Ein Stromleiter, welcher eine gebrochene Linie darstellt

oder in Zick-Zack-Form verläuft, übt auf einen benachbarten Stromleiter dieselben magnetischen Wirkungen aus, als wenn er gerade wäre.

c) In keinem der verschiedenen Fälle hat man eine Kraft, welche einen Konduktor in seiner eigenen Längsrichtung zu bewegen strebt.

d) Die Kraft zwischen 2 Konduktoren von beliebiger Gestalt ist unabhängig von der linearen Grösse des Systems, vorausgesetzt, dass die Abstände in demselben Verhältnis wachsen, wie die Längen der Konduktoren, und dass die Stromstärken unverändert bleiben.

Der besondere Fall der Fig. 193 lässt den Wert dieser Versuche erkennen. AB und CD mögen zwei stromführende

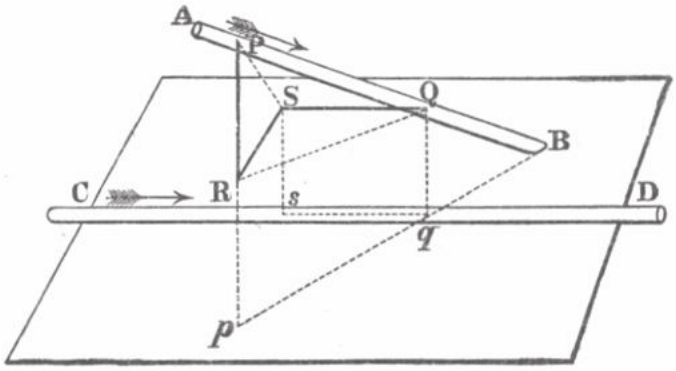


Fig. 193.

Drähte sein, welche weder parallel laufen, noch in derselben Ebene liegen. Aus Satz b) ergiebt sich, dass die Kraft dieselbe bleibt, wenn wir das Stück PQ durch den gebogenen Draht PRSQ ersetzen. Das Stück PR führt senkrecht nach unten, und da auf dasselbe nach Satz c) keine Kraft in der Richtung seiner Länge wirken kann, so wird dies Stück von CD weder angezogen noch abgestossen. In dem Stücke RS fliesst der Strom rechtwinklig zu CD, so dass auch dieses Stück von CD weder angezogen, noch abgestossen wird. In dem Teile SQ fliesst der Strom parallel zu CD und in derselben Richtung, und folglich wird SQ nach unten gezogen. Das Gesamtresultat ist also, dass PQ nach CD gezogen wird. Auf die Stücke PR und RS wirken jedoch drehende Kräfte, indem P um R als

Mittelpunkt nach C und R horizontal um S ebenfalls nach C getrieben werden. Infolge dieser Kräfte würde AB das Bestreben haben, sich parallel zu CD zu stellen.

387. Ampère's Theorie. Gestützt auf die 4 vorhergehenden experimentellen Sätze, stellte Ampère eine sorgfältig ausgearbeitete mathematische Theorie auf, bei welcher er annahm, dass für den Fall dieser Kräfte, welche offenbar durch einen leeren Raum in die Ferne wirkten, die Wirkung zwischen 2 Punkten in gerader Linie erfolgte, und die Gesamtanziehung der Summe der einzelnen Anziehungen gleich wäre.

Eine kurze Zusammenstellung muss genügen. Betrachten wir zunächst zwei parallele Elemente von den Längen dl_1 und dl_2, welche die Ströme C_1 C_2 führen und rechtwinklig zu ihrem Abstande r stehen, so ist die Kraft, welche sie auf einander ausüben:

$$df = -\frac{C_1 C_2 dl_1 dl_2}{100 r^2}.$$

Sind dieselben nicht parallel und auch nicht in einer Ebene, so sei φ der von ihnen eingeschlossene Winkel und Θ_1 und Θ_2 die Winkel, welche sie mit r bilden. Dann ist:

$$df = -\frac{C_1 C_2 dl_1 dl_2 (\cos\varphi - \frac{3}{2}\cos\Theta_1 \cos\Theta_2)}{100 r^2}.$$

Durch Integration dieses Ausdruckes ergeben sich die Kräfte für Stromleiter von beliebiger Länge. Für zwei parallele gerade Konduktoren von den Längen l_1 und l_2 erhält man z. B.

$$f = -\frac{2 C_1 C_2 l_1 l_2}{100 r}$$

vorausgesetzt, dass jene Länge im Vergleich zu ihrem Abstande r sehr gross sind.

Faraday's Untersuchungen haben jedoch zu andern Anschauungen geführt: wir betrachten jetzt die gegenseitigen Anziehungen und Abstossungen als eine Folge von Kräften, welche in dem den Raum um und zwischen den Leitern füllenden Medium wirken. Alle diese sogenannten elektrodynamischen Wirkungen sind bloss magnetische Wirkungen.

Einen interessanten Versuch, welcher eine offenbare gegenseitige Abstossung zwischen benachbarten Teilen eines Stromleiters erkennen lässt, stellte Ampère in folgender Weise an. Ein durch eine Scheidewand in zwei Teile geteilter Trog, welcher aus nicht leitendem Material verfertigt ist, wird mit Quecksilber angefüllt. Auf demselben schwimmt ein metallener Bügel (aus Draht gebogen), von der in Fig. 194 veranschaulichten

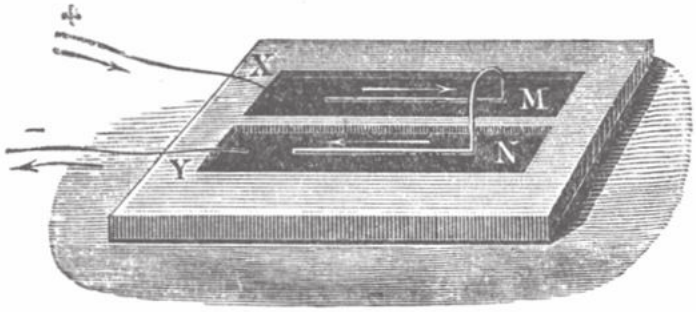


Fig. 194.

Gestalt, oder auch eine heberartige mit Quecksilber gefüllte Glasröhre. Wird durch den schwimmenden Konduktor ein Strom von X über MN und zurück nach Y gesandt, so bemerkt man, dass der schwimmende Bügel sich derart bewegt, dass die Länge des Stromlaufes dadurch vergrössert wird. Die Kraft würde jedoch unbegrenzt abnehmen, wenn die beiden parallelen Teile ganz nahe neben einander liegen könnten.

388. Elektromagnetische Rotationen. Eine kontinuierliche Rotation lässt sich zwischen einem Magnet und einem Strom herstellen, oder auch zwischen 2 Teilen eines Stromes, vorausgesetzt, dass ein Teil des Stromes beweglich ist, während ein anderer fest bleibt, oder dass der Strom in dem einen Teile umgekehrt werden kann. Von dem letzteren Mittel macht man bei Konstruktion elektrischer Motoren Anwendung (Art. 438); die beiden ersten Methoden wendet man bei einigen historischen Apparaten an, welche Rotationen zur Anschauung bringen sollen, indem man zwischen 2 Teilen eines Stromes eine gleitende Berührung (Schleifkontakt) herstellt. Faraday und Ampère konstruierten ver-

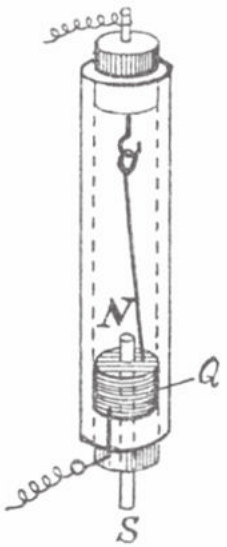


Fig. 195.

schiedene Arten von Rotationsapparaten. Einen solchen von Faraday zeigt Fig. 195, wo ein stromführender Draht, der oben eingehakt ist, in eine Schale mit Quecksilber taucht, welche den Pol eines Magnets umgiebt. Schliesst man den Strom, so beginnt der Draht sich um den Pol zu bewegen und zwar so lange, bis der Strom unterbrochen wird.

Ein Magnetpol kann auch zur Rotation um einen Strom veranlasst werden; und wenn ein vertikaler Magnet so aufgestellt ist, dass er sich um seine eigene Achse drehen kann, so rotiert derselbe, wenn ein Strom in seiner Mitte zu- und an seinen beiden Enden wieder abgeleitet wird. Wird der Strom an dem einen Ende zu- und am andern wieder abgeleitet, so findet keine Rotation statt, da die beiden Pole auf diese Weise nach entgegengesetzten Richtungen rotieren müssten, was unmöglich ist. Auch an flüssigen Leitern können elektromagnetische Rotationen stattfinden. Ein cylinderförmiges Metallgefäss, welches mit dem einen Pole einer Batterie verbunden ist, sei mit Quecksilber oder verdünnter Säure angefüllt, und es tauche ein Draht vom andern Pole in die Mitte der Flüssigkeit, so dass ein Strom vom Zentrum längs eines Radius nach dem Umfange fliessen kann oder umgekehrt; dann bemerkt man, dass die Flüssigkeit rotiert, wenn ein Magnet vertikal darüber gehalten wird oder das Gefäss auf den Pol eines kräftigen Magnets gestellt wird.

389. Elektrodynamometer. W. Weber konstruierte ein unter dem Namen *Elektrodynamometer* bekanntes Instrument, mittelst dessen man die Stromstärke durch die elektrodynamische Wirkung eines Teils des Stromleiters auf einen andern Teil desselben messen kann. Es ist in der That eine Art Galvanometer, bei welchem statt einer Nadel eine kleine Drahtrolle aufgehängt wird. Eine Form dieses Apparates, wo sowohl die grossen äussern, als auch die kleinen innern Rollen aus zwei parallelen Rollen mit vielen Windungen bestehen, zeigt Fig. 196. Die innere Rolle CD ist so aufgehängt, dass ihre Achse rechtwinklig ist zu der Achse der äussern Rollen AA, BB,

und wird *bifilar* (vergl. Art. 130) von zwei feinen Metalldrähten getragen. Wenn ein Strom durch *beide* Rollen in *beliebiger* Richtung fliesst, so strebt die innere Rolle sich zu drehen, und ihre Windungen denen der äussern Rollen parallel zu stellen; der Sinus des Winkels, um welchen die Aufhänge-Drähte gegen einander gedreht werden, ist dann dem Quadrate der Stromstärke proportional. Ist G die Hauptkonstante (Art. 208) der grossen Rollen, und g das Moment der kleinen Rollen (Art. 341), falls sie die Stromeinheit führen, und sind C_1 C_2 die Ströme in ihnen, so ist das Drehungsmoment

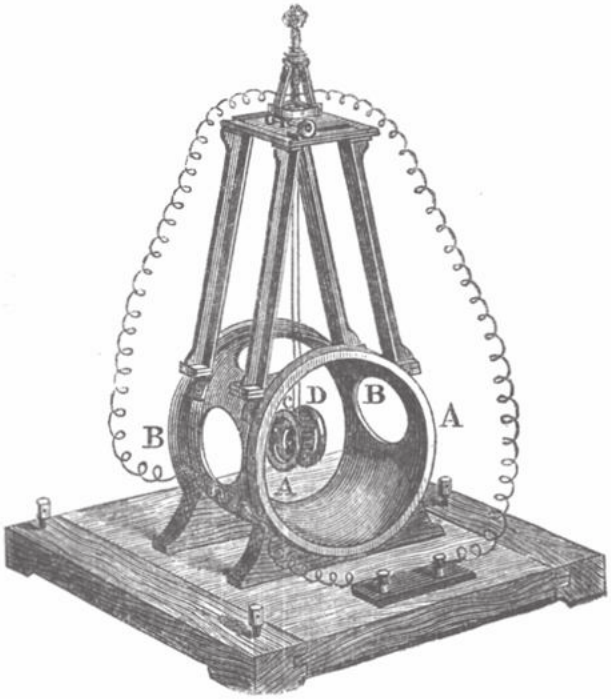


Fig. 196.

$$= \frac{G \cdot g \cdot C_1 C_2}{100}.$$

Der Hauptvorteil dieses Apparates vor einem Galvanometer besteht darin, dass sich derselbe auch zur Messung von Wechselströmen eignet, bei denen sehr schnelle Wechsel stattfinden, indem einem Strome in einer Richtung ein Strom von entgegengesetzter Richtung folgt und dieser Wechsel in der Minute gegen tausendmal stattfindet. Eine Galvanometernadel wird durch solche Ströme kaum beeinflusst, da die Nadel nur zittert, ohne sich zu drehen.

390. Siemens' Elektrodynamometer. Bei dem Dynamometer von Siemens (Fig. 197), welches häufig zur Messung starker Ströme benutzt wird (sowohl von kontinuierlichen als Wechselströmen) ist eine Rolle fest, während die andere, aus 1 oder 2 Windungen bestehend, mit ihren Enden in Quecksilbernäpfe taucht, rechtwinklig aufgehängt ist und durch eine Spiral-

feder unterhalb einer Torsionsscheibe kontrolliert wird. Wenn der Strom hindurchgeschickt wird, so ist die bewegliche Rolle bestrebt, sich parallel zu den festen Rollen zu stellen, wird je-

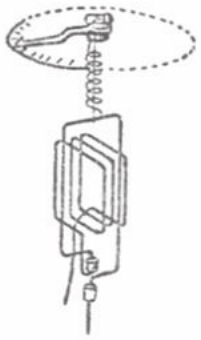


Fig. 197.

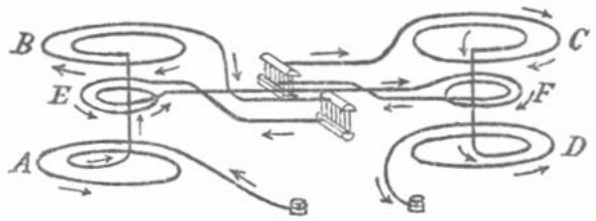


Fig. 198.

doch daran verhindert, da der Zeiger der Torsionsscheibe sich solange dreht, bis die Torsion der Feder dem Drehungsmomente gleichkommt. Der Winkel, um welchen der Zeiger gedreht werden musste, ist proportional dem Produkte C_1 C_2, den Strömen in der festen und der beweglichen Rolle. Ueber die Anwendung des Dynamometers als *Wattmeter* vergl. Art. 433.

391. Kelvin's Strom-Wagen. Joule, Mascart, Rayleigh u. A. haben Ströme durch Wagen gemessen, bei denen die Schwerkraft der Anziehung oder Abstossung zweier Rollen das Gleichgewicht hält. Unter diesen Wagen sind die Kelvin'schen die vollkommensten, deren Prinzip in Fig. 198 veranschaulicht ist. Es sind 4 feste Rollen A, B, C, D vorhanden, zwischen denen mittelst eines biegsamen Metallbandes von feinen Drähten, an den Enden eines leichten Hebels, zwei bewegliche Rollen, E und F, aufgehängt sind. Der Strom fliesst in einer solchen Richtung durch alle 6 Rollen, dass der Hebel bei F aufwärts und bei E abwärts zu gehen strebt. Der Hebel trägt am Ende F eine kleine Pfanne, und einen leichten Arm (in Fig. 198 nicht sichtbar, wohl aber in Fig. 199), an welchem wie an einer Schnellwage ein Laufgewicht hin und her bewegt werden kann, um dem vom Strome herrührenden Drehungsmomente das Gleichgewicht zu halten. Der Strom ist der Quadratwurzel dieses Drehungsmomentes proportional, da die Kraft dem Produkte

des Stromes in den festen und beweglichen Rollen proportional ist, wie bei allen Elektrodynamometern.

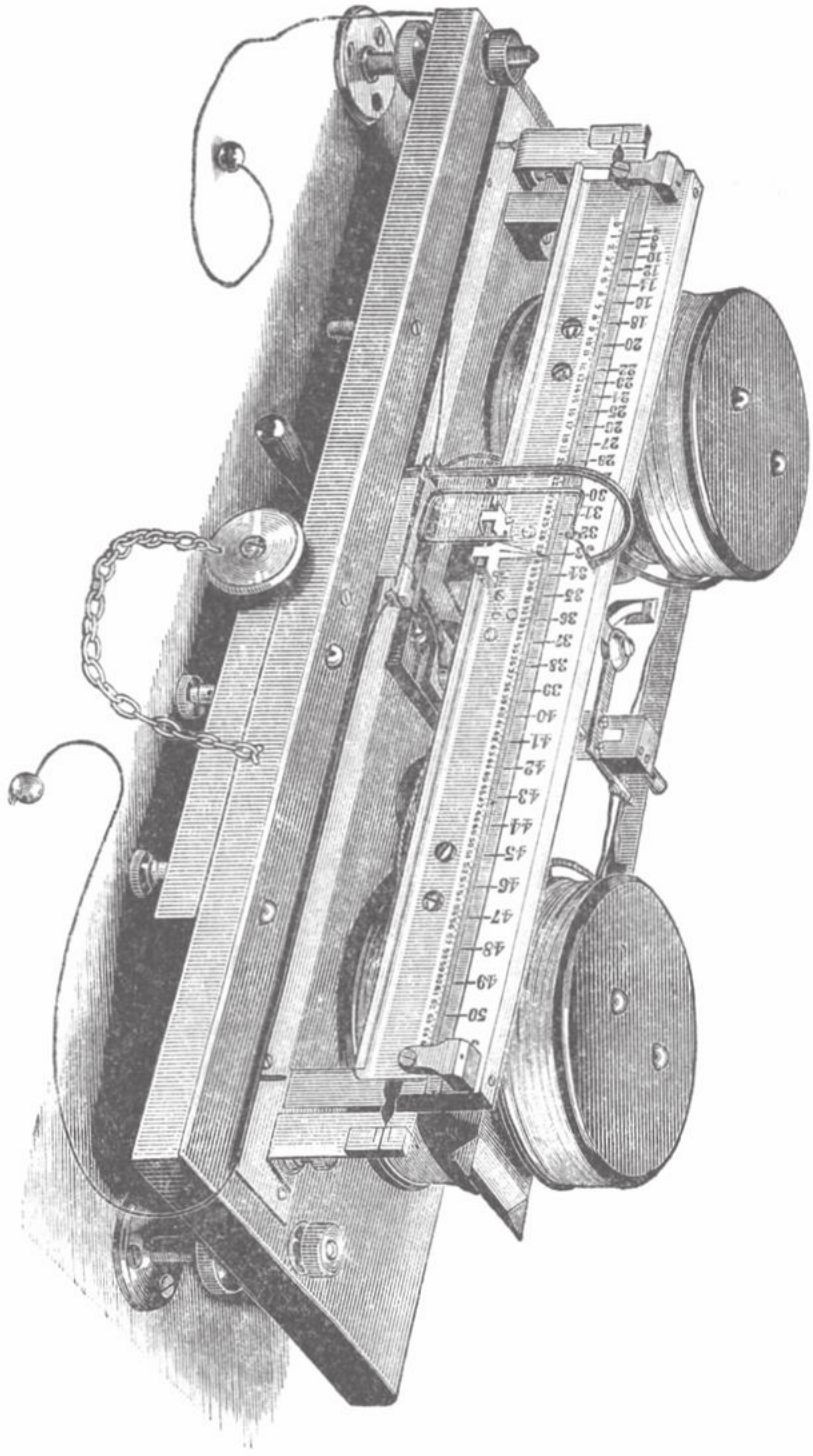


Fig. 199.

Kelvin konstruierte eine ganze Reihe solcher Apparate[1]): eine Centi-Ampère-Wage, welche Ablesungen von 0,01 bis 1 Am-

1) Genaueres über diese Stromwagen und die auf demselben Prinzipe beruhenden Wattmeter findet sich in Gray, Absolute elektrische und magnetische Messungen.

père gestattet; eine Deci-Ampère-Wage, mit Ablesungen von 0,1 bis 10; eine Deka-Ampère-Wage, von 1 bis 100; eine Hekto-Ampère-Wage, von 6 bis 100, und eine Kilo-Ampère-Wage, bis zu 2500 Ampère. Die Centi-Ampère Wage zeigt Fig. 201. Jeder Strom, der durch die Rollen geht, lässt den Hebel sich neigen und der Zeiger bewegt sich (mittelst eines sich selbst lösenden, an Fäden befestigten Schiebers), bis derselbe wieder horizontal steht. Mit einem bestimmten Gewichtepaar giebt die feste Skala den Strom in Dezimalteilen eines Ampère; bei Anwendung anderer Gewichte ergiebt sich ein grösserer Bereich.

Das Normal-Ampère-Instrument und das Normal-Volt-Instrument, welche in Whitehall als gesetzliche Maße für Gross-Britannien aufbewahrt werden, sind Stromwagen besonderer, von Cardew angegebener Konstruktion.

392. Elektromagnetische Wirkungen von Konvektions-Strömen. Nach Faraday wirkt ein Strom von elektrisch geladenen Molekülen magnetisch wie ein wirklicher Konduktionsstrom. Dies wurde zuerst im Jahre 1876 von Rowland nachgewiesen, welcher fand, dass eine geladene, in schnelle Rotation versetzte Scheibe auf einen Magnet dieselbe Wirkung ausübt, welche ein schwacher, kreisförmiger Strom haben würde. Konvektionsströme, welche aus Strömen elektrisierter Moleküle bestehen, erfahren von Magneten ebenfalls eine Einwirkung. Die Konvektions-Entladungen in luftleeren Röhren (Art. 315) können durch einen Magnet abgelenkt oder zur Rotation um einen Magnetpol veranlasst werden. Findet die Büschelentladung (Art. 314) in einem starken magnetischen Felde statt, so wird dieselbe ebenfalls abgelenkt. Der Volta'sche Bogen (Art. 443) verhält sich ebenfalls wie ein biegsamer Konduktor und kann von einem Magnet angezogen oder abgestossen werden. Zwei in Ruhe befindliche, positiv elektrisierte Moleküle stossen einander ab, aber zwei parallele Ströme ziehen sich an (Art. 385), und wenn elektrisierte Moleküle, die sich hinter einander bewegen, wie Ströme wirken, so müsste eine (elektromagnetische) Anziehung zwischen zwei elektrisierten Molekülen stattfinden,

die sich neben einander im Raume fortbewegen. Nach Maxwell's Theorie (Art. 513) ist die elektrostatische Abstossung genau der elektromagnetischen Anziehung gleich, wenn die Moleküle sich mit der Geschwindigkeit des Lichts bewegen.

Im Jahre 1879 machte Hall die Entdeckung, dass in dem Falle, wo man einen kräftigen Magnet auf einen Strom wirken lässt, welcher in einem sehr dünnen Metallstreifen fliesst, die Linien gleichen Potentials nicht mehr rechtwinklig zu den Strombahnen in dem Streifen sind. Diese Wirkung scheint mit der magnetischen Rotation des polarisierten Lichts (Art. 521) im Zusammenhange zu stehen, da der Koeffizient dieser transversalen Verschiebung, welche das magnetische Feld an dem Strome hervorbringt, bei Gold schwach positiv, bei Wismut stark +, bei Eisen — ist und unendlich stark negativ bei dem Tellur. Der Verfasser dieser Vorlesungen (und fast gleichzeitig auch Righi) hat nachgewiesen, dass diejenigen Metalle, welche den Hall-Effekt aufweisen, eine Aenderung in ihrem elektrischen Widerstande erleiden, wenn sie in ein magnetisches Feld gebracht werden. Der Widerstand des Wismut nimmt so stark zu, dass derselbe zur Messung der Stärke magnetischer Felder benutzt werden kann.

393. Ampère's Theorie des Magnetismus. Nachdem Ampère gefunden hatte, dass Solenoide (siehe Fig. 187) genau wie Magnete wirken, kam er auf den Gedanken, alle Magnete einfach als Vereinigungen von Strömen aufzufassen oder anzunehmen, dass um jedes einzelne Molekül eines Magnets beständig ein elektrischer Strom zirkuliert. Wir wissen, dass solche Ströme nicht ohne Unterlass fliessen könnten, wenn sie auf irgend welchen Widerstand stiessen, und wir wissen ferner, dass ein Widerstand existiert, wenn die Elektrizität von einem Molekül zum andern übergeht. Da wir über den innern Zustand der Moleküle selbst nichts wissen, so können wir nicht mit Gewissheit behaupten, dass Ampère's Annahme unmöglich ist. Da ein Stromring der Elektrizität wie ein Magnet wirkt, so scheint in der That Grund zu der Annahme zu sein, dass Magnete bloss aus rotierenden Teilen elektrisierter Materie bestehen.

KAPITEL VI.

VON DER STROMMESSUNG etc.

XXXIII. VORLESUNG: *Das Ohm'sche Gesetz und seine Folgerungen.*

394. In Art. 186 wurde das wichtige Ohm'sche Gesetz wie folgt aufgestellt: *Die Stromstärke ist der elektromotorischen Kraft direkt und dem (Gesamt)-Widerstande des Stromkreises umgekehrt proportional.*

Bei Anwendung der von den Elektrotechnikern benutzten Einheiten, welche wir in Art. 349 erklärten, können wir jetzt dem Ohm'schen Gesetze folgenden bestimmten Ausdruck geben: *Die Anzahl der Ampère eines Stromes, welcher durch einen Stromleiter fliesst, ist gleich der Anzahl von Volt der elektromotorischen Kraft, dividiert durch die Anzahl der Ohm des im ganzen Stromleiter vorhandenen Widerstandes.* Oder

$$\text{Ampère} = \frac{\text{Volt}}{\text{Ohm}},\quad C = \frac{E}{R}.$$

In der Praxis ist die Sache jedoch nicht ganz so einfach, denn nehmen wir eine bestimmte Anzahl von Elementen und bilden den Stromleiter aus verschiedenen Teilen, welche der Strom alle durchfliessen muss, so haben wir nicht allein die elektromotorischen Kräfte der Elemente, sondern auch ihre Widerstände und den Widerstand aller Teile des Stromkreises in Rechnung zu bringen. Fliesst der Strom z. B. von der Zinkplatte des ersten

Elements durch die Flüssigkeit zur Kohle, von dort durch einen Verbindungsdraht oder eine Schraube zum nächsten Elemente, durch die Flüssigkeit desselben, durch die Verbindungsschrauben und Flüssigkeiten der übrigen Elemente, dann durch einen Draht nach einem Galvanometer, dann durch die Rollen des Galvanometers, hierauf etwa durch einen elektrolytischen Becher und endlich durch einen Draht zum Zinkpole der Batterie zurück. In diesem Falle haben wir mehrere einzelne elektromotorische Kräfte, welche sämtlich einen Strom veranlassen, und eine Anzahl von verschiedenen Widerständen, von denen jeder den Strom hemmt und zu dem Gesamt-Widerstande beiträgt. Wenn wir in diesem Falle die einzelnen Werte aller verschiedenen elektromotorischen Kräfte und aller verschiedenen Widerstände wüssten, so könnten wir die Stromstärke berechnen, denn dieselbe würde den Wert haben:

$$C = \frac{e' + e'' + e''' + \ldots .}{r' + r'' + r''' + \ldots .}, \text{ oder}$$

$$C = \frac{\text{Gesamte elektromotorische Kraft}}{\text{Gesamtwiderstand.}}$$

Beispiel. Es seien 5 Elemente in Serien verbunden, jedes mit 1,4 Volt und einem innern Widerstande $r = 0{,}4$ Ohm; der äussere Widerstand sei 3 Ohm. Dann ist $E = 7$ Volt und $R = 5$ Ohm, folglich $C = 1{,}4$ Ampère.

Wäre eines der Elemente verkehrt aufgestellt, so würde seine elektromotorische Kraft derjenigen der andern Elemente entgegenarbeiten; eine entgegengesetzte elektromotorische Kraft muss daher subtrahiert oder in der algebraischen Summe als negativ genommen werden. Die »Polarisation« (Art. 170 und 482), welche in Batterieen oder elektrolytischen Zellen auftritt, nachdem dieselben eine Zeit lang in Thätigkeit gewesen sind, ist eine entgegengesetzte elektromotorische Kraft, und vermindert die Summe der elektromotorischen Kräfte des Stromkreises. In gleicher Weise wird die Stärke des arbeitenden Stromes durch den induzierten Extrastrom geschwächt, welcher entsteht, wenn ein Strom einer Batterie einen elektrischen Motor (Art. 439) treibt.

In diesem Falle ist

$$C = \frac{E - e}{R},$$

wo E die elektromotorische Kraft der Batterie, e die entgegengesetzt gerichtete E.M.K. und R der totale Widerstand ist.

Beispiel. Die Batterie erzeuge einen Strom bei 25 Volt, und der Motor eine entgegengesetzt gerichtete E.M.K. von 20 Volt, ferner sei der totale Widerstand 2,5 Ohm, so hat man einen Strom von 2 Ampère.

Wir können das Ohm'sche Gesetz auch auf einen Teil eines Stromleiters anwenden. Bedeutet e die Potentialdifferenz zwischen den beiden Endpunkten eines Konduktors vom Widerstande r, so ist der Strom in demselben $\frac{e}{r}$, oder anders ausgedrückt, die E.M.K., welche erforderlich ist, um C Ampère durch einen Widerstand von r Ohm zu treiben, ist $e = r \,.\, C$ Volt.

Betrachten wir einen Stromkreis, dessen Widerstand aus zwei Teilen besteht, aus einem äussern Widerstande R, bestehend in Drähten, Lampen etc., und aus einem kleinern innern Widerstande r, welcher in der Batterie oder der Dynamo liegt (nämlich der Widerstand der Flüssigkeiten in den Elementen oder des Drahtes der Armatur). Ist E die gesamte E.M.K., so haben wir den Strom

$$C = \frac{E}{R + r}, \text{ folglich } E = C \,.\, R + C \,.\, r.$$

In Worten heisst dies: Die Gesamtzahl der Volt wird dazu verwandt, um den Strom teils durch den äussern Widerstand R, teils durch den innern Widerstand r zu treiben. Diesen letzteren Teil der E.M.K. nennt man die *Verlust-Volt*, der Rest sind die nützlichen oder äusserlich brauchbaren Volt, welche durch ein mit den Enden verbundenes Voltmeter (Art. 215) gemessen werden können. Nennen wir die brauchbaren Volt V, so ist $V = C \,.\, R$, folglich $V = E - C \,.\, r$, d. h. die am Ende eines Elements oder einer Dynamo gemessenen Volt betragen weniger als die gesamte E.M.K., und zwar so viel weniger als die Verlust-Volt ausmachen.

Da letztere dem innern Widerstande proportional sind, so ist es natürlich am vorteilhaftesten, alle innern Widerstände möglichst zu verringern. Nur in dem Falle, wo das Element keinen Strom liefert, sind die äussern Volt gleich der gesamten E.M.K., denn wenn $C = 0$ ist, so ist auch $C \cdot r = 0$.

Beispiel. Eine Dynamo erzeuge ihre Ströme mit einer E.M.K. von 105 Volt. Der innere Widerstand ihrer Armatur sei $\frac{1}{30}$ Ohm. Liefert sie einen Strom von 120 Ampère, so betragen die Verlust-Volt $120 \times \frac{1}{30} = 4$ Volt. Folglich betragen die im äussern Schliessungskreise verwertbaren Volt nur 101.

$$\text{Da } C = \frac{E}{R + r} = \frac{V}{R}, \text{ so folgt } V = E \cdot \frac{R}{R + r}.$$

395. Widerstand. Mit dem Namen Widerstand bezeichnet man diejenige Eigenschaft der Körper, infolge deren sie dem beständigen Durchfliessen der Elektrizität entgegenarbeiten und die Energie des Stromes in Wärme umsetzen. Der Widerstand eines Metalldrahts, welcher auf konstanter Temperatur erhalten wird, ist von der Stärke des durch ihn fliessenden Stromes unabhängig. Hat z. B. ein Draht einen Widerstand von 5 Ohm, so dass bei einer Potentialdifferenz von 10 Volt ein Strom von 2 Ampère in ihm fliesst, so stellt sich heraus, dass bei einer Potentialdifferenz von 1 Volt die Stromstärke gleich 0,2 Ampère ist, indem das Verhältnis zwischen Volt und Ampère in beiden Fällen gleich 5 ist.

Die Widerstandseinheit, oder das *Ohm*, ist ein Normalmaß, welches in der Absicht gewählt wurde, die Widerstände anderer Leiter in bestimmten Zahlen ausdrücken zu können. Seine Definition findet sich in Art. 349. Man thut gut zu behalten, dass 100 Yards (oder 91 m) des gewöhnlichen eisernen Telegraphendrahtes ungefähr einen Widerstand von 1 Ohm haben.

Die Widerstände in einem Schliessungsbogen sind von zweierlei Art: 1) die Widerstände der Leiter selbst (Metalle, Legierungen, Flüssigkeiten); 2) die Widerstände, welche als Folge des *unvollkommenen Kontakts* an Verbindungsstellen auftreten. Die zweite Art Widerstand wird durch Druck verringert, denn wenn die Ober-

flächen zweier Leiter in innigere Berührung mit einander gebracht werden, so kann der Strom leichter von dem einen Leiter zum andern übergehen. Der Kontaktwiderstand zweier Kupferleiter kann je nach dem Drucke unendlich gross oder ein Bruchteil eines Ohms sein.

Die Aenderung des Widerstandes an einer Stelle mit unvollkommenem Kontakt wird beim Telephon-Uebertrager verwertet (Art. 507). Beachtenswert ist die Leitung *gepulverter Metalle.* Ein lockerer Haufe Späne leitet fast gar nicht, infolge des Mangels an Kohäsion oder weil die Teilchen mit einer Luft- oder Staubschicht überzogen sind. Dieselben werden aber sofort gut leitend, wenn in ihrer Nähe eine elektrische Funkenentladung stattfindet (Art. 516). Die Widerstand leistenden Luftschichten werden dann durch kleine innere Entladungen in dem Haufen beseitigt. Ein ganz geringes Schütteln macht das Pulver sofort wieder zum Nichtleiter.

Um das Fliessen der Ströme zu regulieren und behufs elektrischer Messungen (Art. 406), wendet man *veränderliche Widerstände* an. *Widerstandsrollen* (Art. 409) bestehen aus einer Reihe von Rollen, deren jede einem bestimmten Werte von Ohm entspricht, und von denen eine oder mehrere nach Belieben in den Stromkreis eingeschaltet werden können. Ein *Rheostat* besteht aus leicht zu handhabenden Widerständen, indem die in den Stromkreis einzuschaltende Drahtlänge sich durch Drehung eines Hebels regulieren lässt. Bisweilen ist der Rheostat so eingerichtet, dass sein Draht sich auf einer Walze auf- und abwickelt. Bei andern bewegt sich ein Hebel (Fig. 200) über eine Anzahl von Metallknöpfen, wodurch die Länge des Widerstand leistenden Drahtes, durch welchen der Strom fliessen muss, reguliert werden kann. Kohle-Rheostaten bestehen aus einer Anzahl kleiner Tafeln aus harter Kohle, ungefähr 20 qcm gross, die zu einer Säule aufgebaut sind, welche sich durch eine Schraube zusammendrücken lässt, so dass dadurch ein besserer Kontakt her-

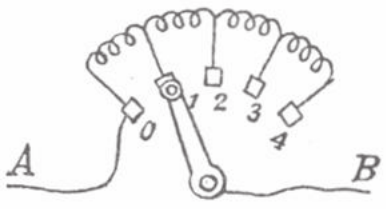


Fig. 200.

gestellt, und infolge dessen der Widerstand vermindert wird.

396. Gesetze über den Widerstand. Die Gesetze über den Widerstand von Leitern sind folgende:

1) *Der Widerstand eines Leitungsdrahtes ist seiner Länge proportional.* Ist der Widerstand eines Telegraphendrahtes von einer Meile = 17 Ohm, so ist derjenige eines 50 Meilen langen Drahtes $50 \times 17 = 850$ Ohm.

2) *Der Widerstand eines Leitungsdrahtes ist der Fläche seines Querschnitts umgekehrt porportional,* und deshalb in den gebräuchlichen runden Drähten *dem Quadrate des Durchmessers umgekehrt proportional.* Der gewöhnliche Telegraphendraht ist ungefähr 0,4 cm dick; ein doppelt so dicker Draht würde 4mal besser leiten, da derselbe einen 4mal so grossen Querschnitt hat; daher würde dieselbe Länge von ihm nur den 4. Teil des Widerstandes bieten.

3) *Der Widerstand eines Leitungsdrahtes von gegebener Länge und Dicke hängt von dem Material ab, aus welchem derselbe verfertigt ist, d. h. von dem* **spezifischen Widerstande** *des Materials.*

Hat ein Draht eine Länge von l Zentimetern, einen Querschnitt von A Quadratzentimetern und ist der spezifische Widerstand des Materials = ρ, so ist sein Widerstand

$$R = \frac{l\rho}{A}.$$

Beispiel. Bestimme den Widerstand eines Platindrahtes von 0,004 qcm Querschnitt und 200 cm Länge, wo $\rho = 32{,}5 \cdot 10^{-6}$ ist. R = 1,625 Ohm.

397. Leitungsfähigkeit und Widerstand. Der Ausdruck *Leitungsfähigkeit* wird bisweilen für das Gegenteil von Widerstand gebraucht; und der reziproke Wert $\frac{1}{r}$ stellt die Leitungsfähigkeit eines Leiters vor, dessen Widerstand gleich r Ohm.

Wenn mehrere Leiter *parallel* zu einander laufen, so ist ihre vereinigte Leitungsfähigkeit gleich der Summe ihrer einzelnen Leitungsfähigkeiten.

Die Leitungsfähigkeit eines Prisma von 1 cm Länge und

1 qcm Querschnitt heisst seine spezifische Leitungsfähigkeit und der Widerstand eines solchen Prisma heisst bisweilen sein spezifischer Widerstand.

398. Spezifischer Widerstand. Der spezifische Widerstand eines Körpers lässt sich am besten als der Widerstand (in Milliontel eines Ohm) eines Kubikzentimeters des Körpers angeben. Die folgende Tabelle giebt auch die relative Leitungsfähigkeit, wobei diejenige des Kupfers gleich 100 gesetzt ist. (Siehe Tabelle Seite 420.)

Es stellt sich heraus, dass diejenigen Körper, welche eine hohe Leitungsfähigkeit in Bezug auf Elektrizität besitzen, auch die besten Wärmeleiter sind; aber das Verhältnis dieser Leitungsfähigkeiten ist nicht konstant, sondern richtet sich nach der absoluten Temperatur.

Bei Flüssigkeiten hat man 3 Abteilungen zu unterscheiden: 1) geschmolzene Metalle und Legierungen leiten wie Metalle; 2) geschmolzene Salze und Lösungen von Salzen und Säuren leiten nur durch *Elektrolyse* (Art. 482); 3) Isolatoren, wie Oele, Terpentin etc., und Brom. Flüssige Elektrolyten sind schlechtere Leiter als die Metalle; Gase, einschliesslich Dampf, sind vollkommene Nichtleiter, ausgenommen den Fall, wo dieselben so stark verdünnt sind, dass durch dieselben eine Entladung durch Konvektion möglich ist (Art. 315).

399. Einfluss der Wärme auf den Widerstand. Temperaturveränderungen üben einen vorübergehenden Einfluss auf die Leitungsfähigkeit der Metalle aus. Fast alle reinen Metalle erhöhen ihren Widerstand um ungefähr 0,4 Prozent bei einer Temperaturzunahme von 1° C. oder ungefähr 40 Prozent bei 100° C. Werden sie in flüssigem Sauerstoff abgekühlt, so nimmt nach Wroblewski der Widerstand bedeutend ab. Ein Kupferdraht, welcher bei 0° einen Widerstand von 17,5 Ohm hatte, hatte bei —201° C. nur noch 1,65 Ohm. Dewar und Fleming fanden, dass alle reinen Metalle eine Abnahme ihres Widerstandes aufweisen, als wenn sie bei —274° C (absoluter Nullpunkt) vollkommene Leiter würden. Dagegen vermindert sich

Körper.	Spez. Widerstand (Mikrohm eines Kubikzentimeters).	Widerstand (Ohm) für 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt.	Relative Leitungsfähigkeit.
Metalle bei 0° C.:			
Kupfer (ausgeglüht) . .	1,570	0,0157	100
» (hart)	1,603	0,0160	98,1
Silber (ausgeglüht) . . .	1,492	0,0149	105
» (hart)	1,620	0,0162	98
Gold	2,077	0,0208	76
Aluminium (ausgeglüht) .	2,889	0,0289	54
Platin	8,982	0,0898	17
Eisen (rein)	9,638	0,0964	16
Eisen (Telegraphendraht) .	15	0,15	10
Blei	19,63	0,1963	8,3
Quecksilber	94,34	0,9434	1,6
Selen	6×10^{10}		$\frac{1}{40,000,000,000}$
Kohle (Graphit)	2400 bis 42000		
Kohle (Bogenlicht) . . .	ca 4000		$\frac{1}{2500}$
Legierungen:			
Argentan (Cu 60, Zn 26, Ni 14)	20,76	0,2076	7,6
Platinsilber (Pt 67, Ag 33)	2,4	0,024	6,5
Platinoid (Cu 59; Zn 25,5; Ni 14; W 55)	32,5	0,325	4,8
Manganin (Cu 84, Ni 12, Mn 3,5)	47,5	0,475	3,3
Flüssigkeiten bei 18° C.:			
Reines Wasser	$26,5 \times 10^{8}$		
Verdünnte Schwefelsäure, 5%	486×10^{4}		
» » » 30%	137×10^{4}		weniger als
» » » 80%	918×10^{4}		1 Milliontel.
Verdünntes schwefelsäures Zinkoxyd, 24% . . .	214×10^{5}		
Verdünnte salpetr. Säure, 30%	129×10^{4}		
Isolatoren:			
Glas bei 20° C.	91×10^{18}		weniger als
» bei 200° C.	$22,7 \times 10^{12}$		1 Billiontel.
Guttapercha, 24° C.	$4,5 \times 10^{20}$		

der Widerstand der Kohle beim Erwärmen. Der Faden einer Glühlampe, welcher bei gewöhnlicher Temperatur einen Widerstand von 230 Ohm hatte, zeigte in der Weissglühhitze nur 150 Ohm. Argentan und andere Legierungen weisen solche grossen Aenderungen nicht auf; deshalb finden sie bei der Konstruktion von Normal-Widerstandsrollen Verwendung. Der Temperatur-Koeffizient des Argentans beträgt nur 0,00044 für 1° C., oder den zehnten Teil desjenigen der reinen Metalle. Dem Platinoid und dem Platinsilber entspricht der Koeffizient 0,00011. Weston fand, dass Legierungen von Mangan, Kupfer und Nickel einen negativen Koeffizienten haben. Diejenigen Flüssigkeiten, welche nur unter gleichzeitiger Zersetzung leiten (Art. 229), leiten besser bei Temperaturerhöhung. Der Einfluss des *Lichtes* bez. des Widerstands des Selens ist in Art. 524 konstatiert. Der Umstand, dass der Widerstand sich mit der Temperatur ändert, wird jetzt bei Callendar's Platin-*Pyrometer* benutzt, um die Temperatur der Schmelzöfen zu messen. Dieselbe Thatsache liegt dem *Bolometer* zu Grunde, welches Langley bei Versuchen über strahlende Wärme benutzte.

400. **Isolatoren.** Mit dem Namen Isolator bezeichnet man einen Körper, dessen Widerstand so gross ist, dass er als Nichtleiter benutzt werden kann. Die Isolatoren sind sowohl in ihren mechanischen Eigenschaften, als auch in ihrem Isolationswiderstande von einander verschieden. Wir können sie in verschiedene Klassen einteilen: 1) *Gläserne*, alle Glassorten und Schlacken umfassend. 2) *Steinartige*, wie Schiefer, Marmor, Steingut, Steatit, Porzellan, Glimmer, Asbest; 3) *Harze*, wie Schellack, Kolophonium, Bienenwachs, Pech, die verschiedenen Gummisorten, Erdharz, Erdwachs; 4) *Elastische*, wie Kautschuk, Guttapercha, Ebonit; 5) *Oele*, wie die verschiedenen Oele und Fette tierischen und pflanzlichen Ursprungs, sowie festes Paraffin und Petroleum; 6) *Cellulose*, wie trockenes Holz und Papier, sowie Papierfabrikate, Faser und Celluloid. Bei allen diesen Körpern nimmt der Widerstand ungemein ab, wenn sie erwärmt werden, und sie werden im allgemeinen zu guten Leitern, sobald sie

einer chemischen Aenderung unterworfen werden. Einige von ihnen (wie Glas) leiten als Elektrolyten, sobald sie weich werden.

Mit dem Namen Isolator bezeichnet man auch die isolierenden Stützen aus Steingut, Porzellan oder Glas, über welche man Telegraphendrähte zieht (Art. 492).

401. Schema eines Stromkreises. Betrachten wir den typischen Fall des in Fig. 201 veranschaulichten Stromkreises, wo eine Batterie ZC mit einem Galvanometer durch Drähte verbunden ist, deren Widerstand R ist. Die gesamte elektromotorische Kraft der Batterie wollen wir E nennen und den gesamten innern Widerstand der Flüssigkeiten in den Elementen r. Der Widerstand der Rollen des Galvanometers möge G heissen. Dann ergibt sich nach dem Ohm'schen Gesetze:

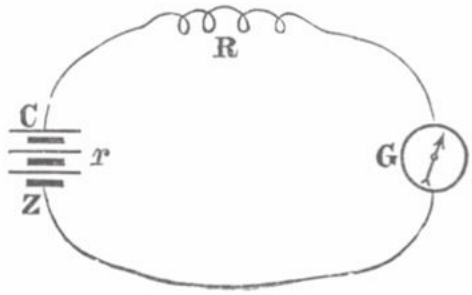


Fig. 201.

$$C = \frac{E}{R + r + G}.$$

Der *innere Widerstand* r der Flüssigkeiten der Batterie steht in einer sehr wichtigen Beziehung zu dem *äussern Widerstande* des Schliessungskreises (R und G umfassend), denn von dieser Beziehung hängt es ab, wie wir für einen besondern Zweck die Elemente der Batterie am besten anordnen. Nehmen wir z. B. an, wir hätten eine Batterie von 50 kleinen Daniell'schen Elementen zur Verfügung, wo wir die elektromotorische Kraft jedes derselben zu einem Volt rechnen können (oder genauer 1,07 Volt) und jedes Element einen innern Widerstand von 2 Ohm hat. Hätten wir diese Elemente in einem Schliessungskreise zu verwenden, wo von Natur schon ein grosser Widerstand auftritt, so würden wir sie »hinter einander« reihen und dieselben nicht in parallelen Reihen eines zusammengesetzten Schliessungsbogens aufstellen. Denn angenommen, wir hätten unsern Strom durch eine Telegraphenlinie von 100 Meilen Länge zu senden, so beträgt der äussere Widerstand R mindestens 1300 Ohm

(wenn wir 13 Ohm auf die Meile Draht rechnen). Infolge dieses Widerstandes würde ein einziges solches Element einen Strom von weniger als einem Milli-Ampère liefern, denn für diesen Fall ist $E = 1$, $R = 1300$, $r = 2$, und daher $C = \frac{E}{R + r}$ $= \frac{1}{1300 + 2} = \frac{1}{1302}$ tel eines Ampère, ein viel zu schwacher Strom, um einen telegraphischen Apparat in Bewegung zu setzen.

Bei 50 solchen Elementen hätten wir $E = 50$, $r = 100$ und daher

$C = \frac{50}{1300 + 100} = \frac{50}{1400} = \frac{1}{28}$ tel eines Ampère, oder etwas mehr als 35 Milli-Ampère. Bei Telegraphenleitungen, wo die Apparate einen Strom von 5 bis 10 Milli-Ampère erfordern, um in Bewegung gesetzt zu werden, rechnet man gewöhnlich für jede 5 Meilen ein Daniell'sches Element mehr, indem jeder Apparat im Schliessungsbogen so gezählt wird, dass sein Widerstand gleich demjenigen eines 10 Meilen langen Drahtes gesetzt wird.

Ist jedoch der Widerstand des äussern Schliessungsbogens gering, so müssen die Elemente derart aufgestellt werden, dass der gesamte innere Widerstand der Batterie gering bleibt. Nehmen wir z. B. an, wir wollten weiter nichts als ein kurzes Stück Platindraht bis zur Rotglühhitze erwärmen, und hätten starke Kupferdrähte, um das Platin mit der Batterie zu verbinden. Hier beträgt der äussere Widerstand unter Umständen weniger als ein Ohm. In diesem Falle würde ein einziges Element einen Strom von ^{1} Ampère (oder 333 Milli-Ampère) durch den Draht senden, denn es ist jetzt $E = 1$, $R = 1$, $r = 2$. Dagegen würden 10 Elemente bloss anderthalb mal so viel liefern, nämlich 476 Milli-Ampère, und 50 Elemente bloss 495 Milli-Ampère, und bei einer unendlich grossen Anzahl von Elementen, in Reihen angeordnet, könnte der Strom doch nicht mehr als 500 Milli-Ampère stark sein, weil durch jedes Element E um 1, R aber um 2 grösser wird. Es ist also klar, dass das Aneinanderfügen vieler Elemente in Reihen allerdings da von Vorteil ist, wo der

Widerstand einer langen Drahtlinie zu überwinden ist, dass jedoch bei geringem äussern Widerstande der praktische Vorteil des Aneinanderfügens von Elementen in Reihen bald eine Grenze erreicht.

Nehmen wir jedoch für diesen zweiten Fall, wo der äussere Widerstand des Schliessungsbogens gering ist, an, dass wir auch den innern Widerstand unserer Batterie verringern, dadurch, dass wir mehrere Elemente »parallel« schalten, indem wir von mehreren Elementen alle Zinkplatten unter sich verbinden, und ebenso ihre Kupferpole (wie in Art. 187 vorgeschlagen wurde), so ergibt sich ein anderes, besseres Resultat. Angenommen, wir hätten auf diese Weise 4 Elemente mit einander verbunden. Ihre elektromotorische Kraft ist dann freilich nicht grösser als die eines einzigen Elements, dagegen ist ihr Widerstand nur der vierte Teil von demjenigen eines solchen Elements oder $\frac{1}{2}$ Ohm. Diese 4 Elemente würden bei einem äussern Widerstande von einem Ohm einen Strom von 666 Milli-Ampère liefern, denn wenn $E = 1$, $R = 1$ und $r = \frac{1}{2}$, so ist

$$C = \frac{E}{R + r} = \frac{2}{3} \text{ Ampère oder 666 Milli-Ampère.}$$

Wenn wir die Elemente einer Batterie in n Reihen aufstellen, wo in jeder Reihe m Elemente in Serien geschaltet sind, so ist die elektromotorische Kraft jeder Reihe m mal grösser als die E.M.K. jedes Elements, also $= m \,.\, E$. Der Widerstand jeder Reihe ist das m-fache vom Widerstande jedes Elements, also $= m \,.\, r$. Da aber n Reihen parallel geschaltet sind, so ist der gesamte innere Widerstand nur $\frac{1}{n}$ vom Widerstande jeder Reihe, also $= \frac{m}{n} \,.\, r$; demnach würde eine solche Batterie nach dem Ohm'schen Gesetze einen Strom:

$$C = \frac{m \,.\, E}{R + \frac{m}{n} \,.\, r}$$

geben.

402. Beste Gruppierung der Elemente. Bei der Frage, wie die Elemente einer Batterie am besten aufzustellen sind,

kommt es wesentlich darauf an, welchen Zweck man verfolgt:

1) *Gruppierung für grösste Sparsamkeit.* Man gruppiere die Elemente derart, dass ihr gesamter innerer Widerstand *sehr klein* im Vergleich zum äussern Widerstande wird. In diesem Falle nutzt sich das Material der Batterie langsam ab, und der Strom fliesst nicht in seiner grössten Stärke; dagegen ergiebt sich ein Minimum von Energieverlust (Art. 430).

2) *Gruppierung für grösste Stromstärke.* Es lässt sich mathematisch beweisen, dass wir bei einer gegebenen Batterie von Elementen, welche durch einen gegebenen äussern Widerstand R wirken sollen, den stärksten konstanten Strom erhalten, wenn wir m und n so wählen, dass *der innere Widerstand* $\left(\frac{m}{n} \cdot r\right)$ *gleich dem äussern Widerstande* wird. Der Leser würde gut daran thun, wenn er diese Regel durch Beispiele verifizierte. Obgleich diese Gruppierung *den stärksten Strom* liefert, ist sie doch nicht die sparsamste; denn ist der innere Widerstand gleich dem äussern, so ist die nützliche Arbeit, welche in dem äussern Schliessungsbogen verrichtet wird, ebenso gross wie die nutzlose Arbeit, welche beim Erwärmen der Elemente verrichtet wird, so dass die Hälfte der Energie vergeudet wird.

3) *Gruppierung für schnellste Wirkung.* Befinden sich im Schliessungsbogen Elektromagnete oder andere Körper mit Selbstinduktion (Art. 453), welche den Strom daran hindern, schnell zu seiner eigentlichen Stärke anzuwachsen, so ist die beste Gruppierung die, dass man den innern Widerstand grösser als den äussern macht, indem man alle Elemente in Serien schaltet (Art. 455).

403. Apparate mit Rollen von grossem und von kleinem Widerstande. Dem Leser wird es jetzt auch nicht schwer fallen zu verstehen, weshalb ein Galvanometer oder ein Elektromagnet mit Rolle von grossem Widerstande oder irgend ein Apparat, bei welchem der Leiter aus einem langen dünnen Drahte von hohem Widerstande besteht, sich nicht für einen Stromkreis eignen, wo sowohl R als auch r sehr klein sind. Der

Leser wird ferner verstehen, weshalb bei Schliessungsbögen von grosser Länge, oder bei denen von Natur schon ein hoher Widerstand auftritt und eine Batterie von bedeutender elektromotorischer Kraft gebraucht wird, Apparate mit Rollen von kleinem Widerstande wenig zu gebrauchen sind, denn obgleich sie die Widerstände nur wenig vergrössern, so reicht ihre geringe Zahl von Drahtwindungen bei den kleinen Strömen, welche in Schliessungsbögen von hohem Widerstande zirkulieren, nicht aus; und weshalb Apparate mit Rollen von grossem Widerstande hier geeignet sind, da sie die Wirkungen der Ströme durch ihre zahlreichen Windungen verstärken, während ihr Widerstand, obgleich unter Umständen ein grosser, die vorhandenen Widerstände des Schliessungsbogens nicht erheblich vermehrt. Die Hauptsache ist, zu beachten, dass die *Beschaffenheit der Linie*, gleichviel ob dieselbe hohen oder geringen Widerstand bietet, nicht allein vorschreibt, wie die Batterie aufzustellen ist, sondern auch, welche Art Rollen in den Instrumenten am besten zu verwenden sind.

404. Stromverzweigung. Wenn ein Stromleiter sich in einem Punkte A (Fig. 202) in zwei Zweige spaltet, welche sich bei B wieder vereinigen, so wird der Strom sich ebenfalls teilen, indem ein Teil durch diesen, der andere durch jenen Zweig fliesst. Jeder Zweig, welcher einem andern Zweige als Nebenweg dient, heisst *Nebengeleis*. *Die relativen Stromstärken in den beiden Zweigen sind ihrer Leitungsfähigkeit proportional, d. h. umgekehrt proportional ihrem Widerstande* [1]). Ist r z. B. ein Draht von 2 Ohm Widerstand, und r' von 3 Ohm, so verhält sich der

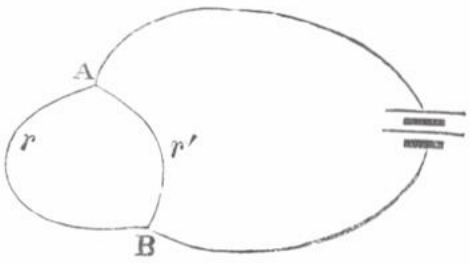


Fig. 202.

1) Es ist ein oft wiederkehrender Irrtum, wenn man annimmt, dass der elektrische Strom stets den Weg des kleinsten Widerstandes einschlägt. Das ist niemals der Fall, obschon ein Teil des Stromes jenen Weg nehmen mag. Er verteilt sich auf die verschiedenen Bahnen, entsprechend ihrer Leitungsfähigkeit. Nur bei Funkenentladungen, wo ein Nichtleiter durchbohrt wird, kann man von einer Linie des geringsten Widerstandes sprechen.

Strom in r zu dem in r', wie r' zu r oder wie 3 : 2, oder $\frac{3}{5}$ des ganzen Stromes fliesst durch r und $\frac{2}{5}$ des ganzen Stromes durch r'.

Der gesamte Widerstand des verzweigten Stromleiters zwischen A und B ist geringer, als der Widerstand jedes Zweiges einzeln, da der Strom sich jetzt einen der beiden Wege aussuchen kann. In der That ist die gesamte Leitungsfähigkeit gleich der Summe der beiden einzelnen Leitungsfähigkeiten. Nennen wir den gesamten Widerstand R, so folgt

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} = \frac{r + r'}{rr'}, \text{ folglich}$$

$$R = \frac{rr'}{r + r'}$$

oder in Worten: *Der gesamte Widerstand eines verzweigten Leiters ist gleich dem Produkte der beiden einzelnen Widerstände, dividiert durch ihre Summe.*

Dies Gesetz heisst bisweilen das Gesetz der Nebengeleise, da jeder Zweig als Nebengeleis für den andern betrachtet werden kann. Eine einfache Konstruktion zur graphischen Bestimmung des Wertes zeigt Fig. 203. Die Lote r und r', in den Endpunkten

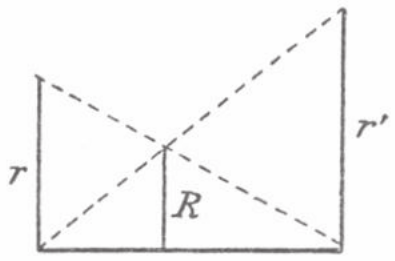


Fig. 203.

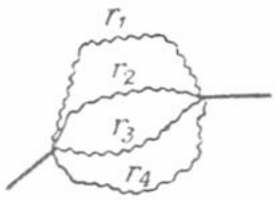


Fig. 204.

einer Geraden errichtet, mögen die beiden Widerstände bedeuten. Zieht man die beiden Diagonalen, so ist das von ihrem Schnittpunkte gefällte Lot der gesamte Widerstand R. Falls drei oder mehr Bahnen neben einander sind, wie in Fig. 204, so lässt sich die Regel wie folgt verallgemeinern: *Der gesamte Widerstand einer Anzahl von nebeneinander liegenden Strombahnen ist gleich dem reziproken Werte der Summe der reziproken Werte der einzelnen Widerstände.*

Kirchhoff hat folgende wichtige Gesetze aufgestellt, welche sich beide aus dem Ohm'schen Gesetze ableiten lassen:

1) In jedem verzweigten Netzwerk von Drähten ist die algebraische Summe der Ströme in allen Drähten, welche in einem Punkte zusammentreffen, gleich Null.

2) Wirken mehrere elektromotorische Kräfte in verschiedenen Punkten eines Stromleiters, so ist die gesamte elektromotorische Kraft im ganzen Stromleiter gleich der Summe der Widerstände seiner einzelnen Teile, jeder derselben multipliziert mit der Stärke des Stromes, welcher durch denselben hindurchfliesst.

405. Ströme in Platten. Tritt der Strom in einen körperlichen Leiter ein, so fliesst derselbe nicht mehr längs einer Linie, sondern breitet sich aus und fliesst durch die Masse des Leiters. Wird ein Strom in eine dünne Platte aus leitender Materie geführt, so breitet sich derselbe zu einer »Stromplatte« aus und fliesst durch die Platte in Richtungen, welche von der Form der Platte und der Lage des Pols abhängen, durch welchen derselbe zur Batterie zurückkehrt. Werden z. B. Drähte von den beiden Polen einer Batterie in Berührung mit zwei benachbarten Punkten A und B in der Mitte einer sehr grossen flachen Scheibe von Zinnfolie gebracht, so fliesst der Strom durch die Folie von A nach B nicht in einer geraden Linie, sondern in krummen »Stromlinien«, welche von A aus nach allen Richtungen laufen und im Bogen nach B führen, in Kurven, die eine grosse Aehnlichkeit mit den »Kraftlinien« haben, welche vom N-Pole zum S-Pole eines Magnets führen (Fig. 65). Wird die Erde als zweiter Draht benutzt, um die Telegraphen-Ströme zu leiten Art. 495, so findet ein ähnliches Ausbreiten der Ströme in Stromplatten statt.

XXXIV. VORLESUNG: *Elektrische Messungen.*

406. Der Elektrotechniker hat elektrische Widerstände, elektromotorische Kräfte und die Kapazitäten von Kondensatoren zu messen. Jede dieser verschiedenen Grössen wird gemessen durch Vergleichung mit gewissen Normal-Maßen, wobei jedoch die Methoden der Vergleichung so verschieden sind, dass wir uns auf eine ausführliche Beschreibung der Sache nicht

einlassen können. Nur einige wenige Fälle können hier erklärt werden.

Das Ohm'sche Gesetz zeigt uns, dass die Stärke eines Stromes, welcher durch eine elektromotorische Kraft entsteht, in demselben Verhältnis abnimmt, wie der Widerstand im Schliessungsbogen zunimmt.

a) Es ist daher möglich, zwei Widerstände mit einander zu vergleichen, indem wir ermitteln, in welchem Verhältnis jeder derselben den Strom einer konstanten Batterie schwächt. Nehmen wir z. B. an, wir hätten in Fig. 201 eine Normal-Batterie von einigen Daniell'schen Elementen, welche mit einem Drahte, dessen Widerstand R unbekannt, sowie mit einem Galvanometer den Stromkreis bilden; dann erhalten wir einen Strom von gewisser Stärke, welche von der eine bestimmte Ablenkung erfahrenden Galvanometernadel angezeigt wird. Entfernen wir den Draht R und ersetzen wir denselben in dem Schliessungsbogen durch Drähte, deren Widerstände wir kennen, so können wir durch Versuche einen solchen finden, welcher dieselbe Ablenkung der Galvanometernadel liefert, wenn er in die Strombahn eingeschaltet wird. Daraus erkennen wir dann, dass dieser Draht und der vorige, welchen wir R nannten, beide dem Strom denselben Widerstand bieten. Eine solche Vergleichung, welche wir eine *Substitutionsmethode* äquivalenter Widerstände nennen können, wurde von Wheatstone, Jacobi und andern weiter ausgeführt, welche den Vorschlag machten, als Normal-Widerstand einen langen dünnen Draht anzuwenden, der um einen hölzernen Cylinder gewunden ist, so dass jede gewünschte Länge des Normal-Drahtes in den Schliessungsbogen eingeschaltet werden kann, indem man eine entsprechende Anzahl von Drahtwindungen von dem Cylinder abwickelt oder indem man in irgend einem verlangten Abstande vom Ende des Drahtes eine Berührung herstellt. Ein solcher Apparat war bekannt unter dem Namen **Rheostat**; derselbe ist jedoch heute durch die weiter unten beschriebenen Widerstandsrollen verdrängt.

b) Die oben angegebene Methode lässt sich mit jedem

Galvanometer von hinreichender Empfindlichkeit ausführen; steht jedoch ein Tangentengalvanometer zu Gebote, so kann der Versuch durch Berechnung abgekürzt werden. Angenommen es sei ein Tangentengalvanometer und ein unbekannter Widerstand R in den Schliessungsbogen eingeschaltet, wie in Fig. 201, und der Strom sei stark genug, um eine Ablenkung von δ Graden hervorzubringen. Dann ersetzen wir R durch einen bekannten Widerstand R', welcher die Ablenkung δ' liefert; vorausgesetzt, dass die andern Widerstände des Schliessungsbogens vernachlässigt werden dürfen, folgt dann, dass, da die Stromstärken zu tan δ und tan δ' proportional sind, der Widerstand R aus der umgekehrten Proportion

$$\tan \delta : \tan \delta' = R' : R$$

berechnet werden kann.

c) Mit Hilfe eines Differentialgalvanometers (Art. 212) und eines Satzes von Normal-Widerstandsrollen ist es leicht, den Widerstand eines Leiters zu messen. Angenommen, der Stromleiter teile sich in zwei Zweige, wie in Fig. 205, so dass ein Teil des Stromes durch den unbekannten Widerstand und um die eine Abteilung der Galvanometerrollen fliesst, der andere Teil des Stromes durch die bekannten Widerstände und dann um die andere Abteilung der Rollen in entgegengesetzter Richtung. Ist es uns gelungen, in den zweiten Zweig einen der bekannten Widerstände einzuschalten, welcher dem unbekannten Widerstande gleich ist, so sind die Ströme in beiden Zweigen einander gleich und die Nadel des Differentialgalvanometers zeigt dann keine Ablenkung. Diese Nullmethode ist sehr zuverlässig.

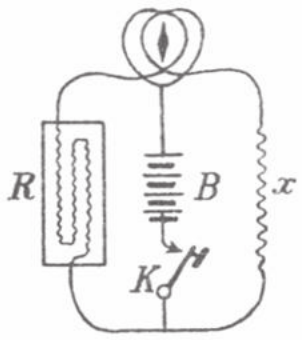


Fig. 205.

d) Die beste Methode aller Widerstandsmessungen ist jedoch diejenige, welche den wichtigen Apparat anwendet, welcher unter dem Namen der Wheatstone'schen Brücke bekannt ist und der weiter unten in Art. 408 beschrieben werden soll.

e) Um sehr grosse Widerstände zu messen, können wir in

der Weise verfahren, dass wir mit Hilfe einer Normal-Batterie einen Kondensator für eine bestimmte Zeit durch den Widerstand hindurch laden und dann die angesammelte Ladung dadurch ermitteln, dass wir dieselbe durch ein ballistisches Galvanometer (Art. 213) entladen.

Bei einer andern Methode lässt man den Kondensator sich durch den grossen Widerstand langsam entladen und achtet dabei auf die Zeit, welche erforderlich ist, damit das Potential auf einen bestimmten Bruchteil seines ursprünglichen Wertes herabsinkt. Diese Zeit ist dem Widerstande, der Kapazität und dem Logarithmus des gegebenen Bruches proportional.

407. Potentialabfall längs eines Drahtes. Zum Verständnis der Wheatstone'schen Brücke ist es nötig, dass wir folgende Bemerkung vorausschicken. Wenn das elektrische Potential verschiedener Punkte eines Stromleiters mit Hilfe eines Elektrometers untersucht wird, wie in Art. 284 auseinandergesetzt wurde, so ergiebt sich, dass das Potential längs des ganzen Stromleiters vom + Pole der Batterie, wo es am grössten ist, bis zum — Pole, wo es am kleinsten ist, abnimmt. Besteht der Stromleiter aus einem Drahte von gleichmässiger Dicke, der also dem Strome einen gleichmässigen Widerstand bietet, so ergiebt sich, dass das Potential gleichmässig fällt; bietet jedoch ein Teil des Stromleiters einen grössern Widerstand als ein anderer Teil, so ergiebt sich, dass das Potential am schnellsten längs des Leiters von grösserm Widerstande fällt.

Wenn wir mit einem geeigneten Voltmeter den Potentialabfall zwischen zwei Punkten *a* und *b* eines Stromkreises (Fig. 206) bestimmen, so finden wir stets, dass ersterer dem Widerstande zwischen diesen beiden Punkten proportional ist. Denn es ist $V = C \cdot R$, folglich ist bei konstantem C die Grösse V eines Teiles der Grösse R dieses Teiles proportional.

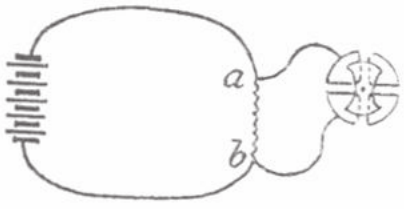


Fig. 206.

Wir wissen z. B., dass, wenn wir um den Stromleiter herumgehen bis zu einem Punkte, wo das Potential um die Hälfte seines

Wertes gefallen ist, der Strom bis zu jenem Punkte die Hälfte der Widerstände überwunden hat. Um einen sehr starken Strom zu messen, thut man am besten, mit Hilfe eines empfindlichen Voltmeters mit Galvanometer den Potentialabfall zu messen, welcher stattfindet, wenn derselbe durch einen bekannten sehr kleinen Widerstand geschickt wird, wie z. B. durch einen Streifen Platinoid von 0,001 Ohm. Um einen sehr kleinen Widerstand zu messen, kann man denselben mit einem andern bekannten kleinen Widerstande verbinden, und die Potentialabfälle vergleichen, wenn derselbe Strom durch beide hindurch fliesst; der Widerstand jedes derselben verhält sich wie der Potentialabfall zwischen seinen Enden.

408. Wheatstone's Brücke. Dieser Apparat, der von Christie angegeben und von Wheatstone zur Messung von Widerständen angewendet wurde, besteht aus einem System von Leitern, deren Diagramm Fig. 207 zeigt. Der Stromleiter einer

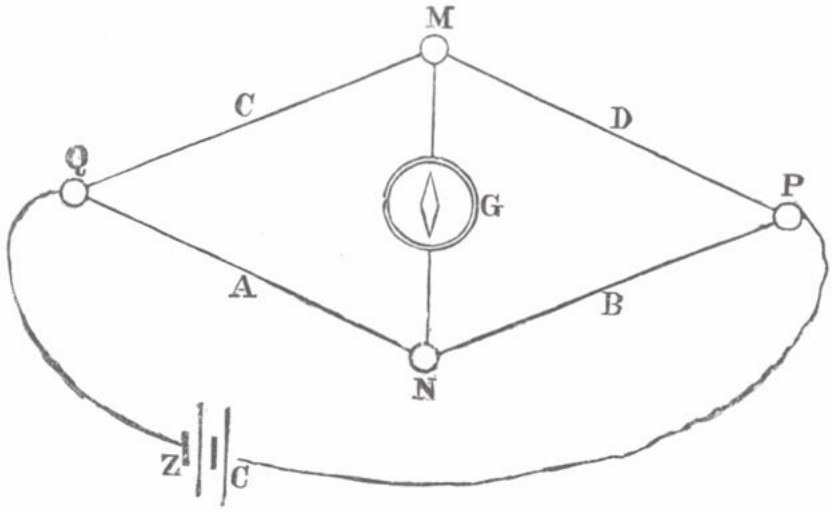


Fig. 207.

konstanten Batterie spaltet sich im Punkte P in zwei Teile, welche sich in Q wieder vereinigen, so dass ein Teil des Stromes durch M, der andere durch N fliesst. Die vier Konduktoren D, C, B, A heissen die »Zweige« der »Brücke«; aus der Proportion, welche zwischen ihren Widerständen besteht, lässt sich der Widerstand eines derselben berechnen, wenn die Widerstände der 3 andern bekannt sind. Wenn der Strom, welcher

vom Punkte C der Batterie ausgeht, in P ankommt, so ist das Potential bis auf einen gewissen Wert gesunken. Das Potential des Stromes in dem obern Zweige fällt bis M und von da weiter bis zum Punkte Q. Das Potential des untern Zweiges fällt bis N und von da weiter, bis es den Wert im Punkte Q erreicht. Hat nun N denselben verhältnismässigen Abstand längs der Widerstände zwischen P und Q, wie M längs der Widerstände der untern Linie zwischen P und Q, so ist das Potential in N auf denselben Wert herabgesunken, wie in M; oder mit andern Worten: Ist das Verhältnis des Widerstandes C zum Widerstande D gleich dem Verhältnis des Widerstandes A zum Widerstande B, so haben M und N gleiches Potential. Um zu untersuchen, ob beide Punkte gleiches Potential haben, stellt man zwischen M und N in einem Verbindungsdrahte ein empfindliches Galvanometer auf; dasselbe zeigt keine Ablenkung, wenn M und N gleiches Potential haben; oder wenn die vier Widerstände der Zweige einander das »Gleichgewicht« halten, so dass die Proportion besteht:

$$A : C = B : D.$$

Kennen wir die Werte A, B und C, so lässt sich D berechnen, denn:

$$D = \frac{B \times C}{A}.$$

Beispiel: Ist A = 10 Ohm, C = 100 Ohm und B = 15 Ohm (wie in Fig. 210), so ist $D = \frac{15 \times 100}{10} = 150$ Ohm.

409. Widerstandsrollen. Drähte von einem Normal-Widerstande werden jetzt von Mechanikern unter dem Namen von **Widerstandsrollen** verkauft. Sie bestehen aus Rollen von Argentan (vergl. Art. 399) (oder bisweilen aus einer Legierung von Silber und Iridium), welche sehr sorgfältig gewunden sind und eine solche Länge haben, dass ihr Widerstand gleich einer bestimmten Anzahl *Ohm* ist. Um Selbstinduktion und die dadurch entstehenden Funken (vergl. Art. 453) beim Oeffnen oder

Schliessen des Stromes zu vermeiden, sind sie auf besondere Art gewunden, wie es die Fig. 208 angiebt, indem jeder Draht (welcher mit Seide oder mit in Paraffin getränkter Baumwolle umwickelt ist) doppelt gelegt wird, ehe derselbe zur Spirale gewunden wird. Beide Enden einer Spirale werden jede an ein festes Messingstück gelötet, wie Spirale 1 an A und B, Spirale 2 an B und C; die Messingstücke selbst werden an einem Block von Ebonit befestigt (welcher den Deckel des »Widerstandskastens« bildet), so dass zwischen denselben ein genügender Raum bleibt für die Einschaltung starker, gut passender konischer Messingstöpsel. Fig. 209 zeigt einen kom-

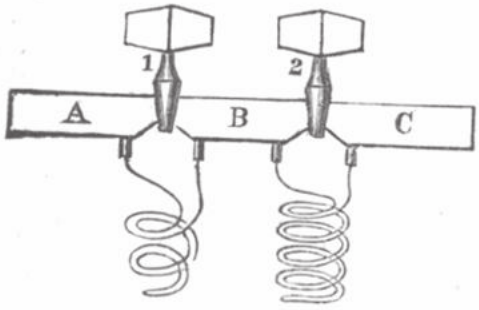


Fig. 208.

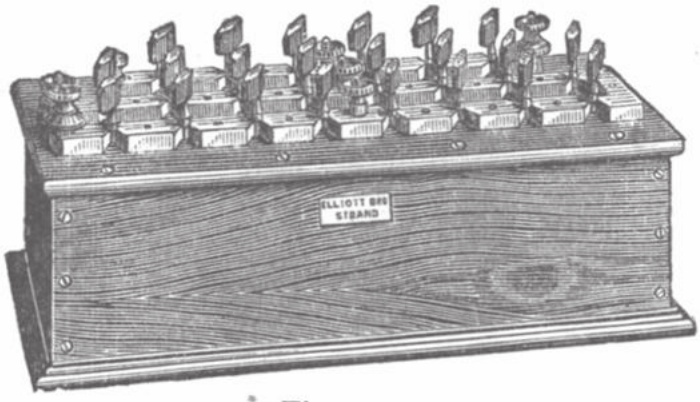


Fig. 209.

pletten Widerstandskasten, welcher zu elektrischen Versuchen geeignet ist, mit den Stöpseln an ihren Plätzen. So lange die Stöpsel eingesteckt bleiben, fliesst der Strom durch die festen Messingstücke und Stöpsel, ohne auf einen grössern Widerstand zu stossen; wird jedoch ein Stöpsel herausgezogen, so kann der Strom von dem einen Messingstücke zum andern nur durch die auf diese Weise in den Stromleiter eingeschaltete Spirale fliessen. Die Reihe der gewählten Spiralen beträgt gewöhnlich folgende in Ohm ausgedrückten Widerstände: 1, 2, 2, 5; 10, 20, 20, 50; 100, 200, 200, 500; .... bis zu 10,000 Ohm. Indem man einen Stöpsel herauszieht, kann man jede beliebige Spirale in den Stromleiter einschalten, und jede gewünschte

Zahl, bis zu 20,000 erreichen, wenn man mehrere Stöpsel herauszieht; so z. B. kann man einen Widerstand von 263 Ohm aus 200 + 50 + 10 + 2 + 1 bilden.

Gewöhnlich werden Wheatstone'sche Brücken in der Weise konstruiert, dass die Arme A und C mehrere Widerstandsrollen haben, und der Arm B mit einem kompletten Satze versehen ist. Der Nutzen dieser Anordnung besteht darin, dass wir durch Einstellung von A und C das Verhältnis zwischen B und D bestimmen und in gewissen Fällen bis auf Bruchteile eines Ohms messen können. Fig. 210 zeigt ein vollständigeres Schema,

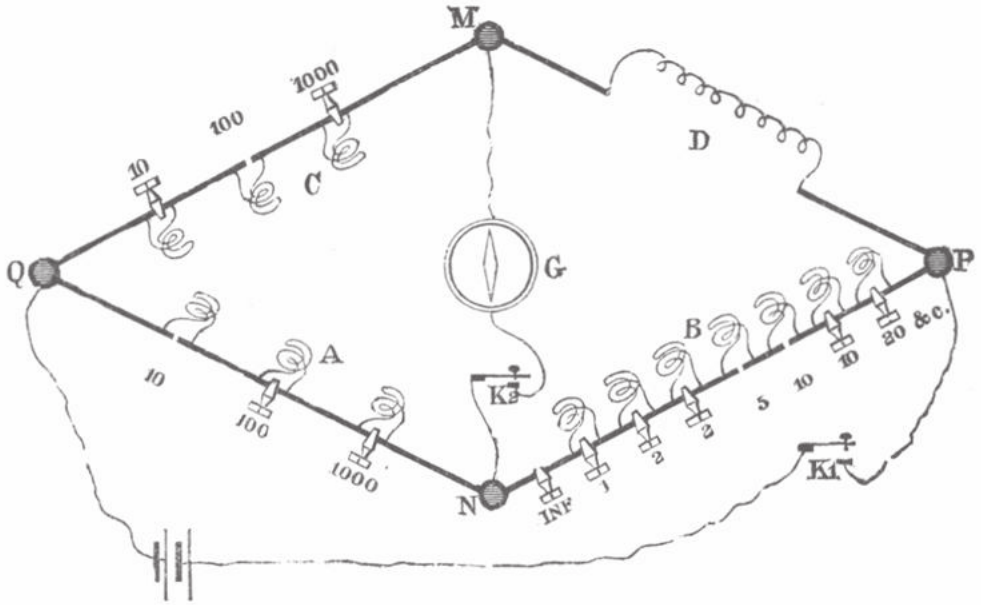


Fig. 210.

wo Widerstände von 10, 100 und 1000 Ohm in die Arme A und C eingeschaltet sind.

Beispiel. Angenommen, wir hätten einen Draht, dessen Widerstand, wie wir wüssten, zwischen 46 und 47 Ohm liegt, und wir wollten den Bruchteil eines Ohm messen, so müssten wir den Draht in D einschalten und A = 100 Ohm und C = 10 Ohm machen; in diesem Falle würde dem Arme D ein Widerstand in B, welcher das 10fache des Drahtes D wäre, das Gleichgewicht halten. Hätten wir diesen durch den Versuch auf 464 Ohm geschätzt, so wissen wir, dass D = 464 × 10 : 100 = 46,4 Ohm.

410. Andere Brückenmuster. In der Praxis wird die Brücke selten in der rechteckförmigen Gestalt der Diagramme angefertigt.

Postamt-Brücke. Der Widerstandskasten (Fig. 210) ist eine vollständige Brücke des Postamt-Musters, indem die geeigneten Verbindungen durch Schrauben an verschiedenen Punkten hergestellt werden. Beim Gebrauch der Brücke sollte man den Batteriestrom stets in der Weise herstellen, dass man erst den Schlüssel K_1 niederdrückt, und hierauf den Schlüssel K_2 des Galvanometers, um das plötzliche, heftige »Umdrehen« der Galvanometernadel zu vermeiden, welches beim Schliessen des Stromes infolge von Selbstinduktion (Art. 453) eintritt.

Zeiger-Brücke. Um Irrtümer zu vermeiden, welche infolge der grossen Anzahl der gebrauchten Stöpsel eintreten können, ordnet man die Rollen einer Brücke bisweilen strahlenförmig unter einer Scheibe an, die Einer der Ohm längs dieses, die Zehner längs jenes Radius u. s. w., wobei jeder Radius nur einen Stöpsel hat, oder einen beweglichen Arm, wie in Fig. 200.

Meter-Brücke. Dieselbe ist eine einfache Form, welche sich besonders zur Messung von Widerständen eignet, die nur einige hundert Ohm gross sind. Auf einem langen Brette ist über einer Skala ein gleichförmig dicker Draht von 1 m Länge ausgespannt, bestehend aus Argentan oder einer andern Legierung. Seine Enden sind an dicken Kupferstücken befestigt. A, B, C und D sind 4 Widerstände (Fig. 211), die durch starke Kupfer-

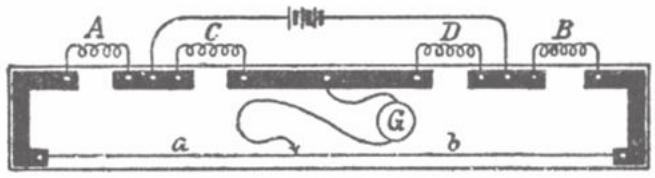


Fig. 211.

streifen mit einander verbunden sind. Wenn der Draht vom Galvanometer längs des Drahtes nach einem Punkte gleitet, so dass kein Strom vorhanden ist, so folgt, dass

$$(A + a) : (B + b) = C : D.$$

Foster's Methode, *kleine Widerstandsdifferenzen zu messen,* besteht

darin, an einer gewissen Stelle des Drahtes Gleichgewicht herzustellen, dann A und B zu vertauschen und an einer andern Stelle wieder Gleichgewicht herzustellen. Der Widerstand des Drahtstückes zwischen den beiden Punkten ist dann gleich der *Differenz* der Widerstände A und B.

In einfacherer Weise lässt sich die Brücke verwenden, wenn man A und B durch Streifen von keinem merklichen Widerstande ersetzt. Dann ist:

$$a : b = C : D.$$

Ist D der unbekannte Widerstand und C bekannt, so lässt sich aus dem Verhältnis der Längen a und b sofort der unbekannte Widerstand berechnen.

Weiteres über Brückenmethoden s. Gray, absolute elektrische und magnetische Messungen; Kempe, Elektrische Messungen und Ayrton, Angewandte Elektrizität.

411. Messung der elektromotorischen Kraft. Da es keine einfache absolute Methode zur Messung elektromotorischer Kräfte giebt, so werden dieselben gewöhnlich in *relativer* Weise gemessen, indem sie mit der elektromotorischen Kraft eines Normal-Elementes, wie z. B. eines von Latimer Clark (Art. 183) verglichen werden. Die Methoden der Vergleichung sind mannigfach; hier sollen nur 5 derselben angeführt werden:

a) Es sei E die zu messende elektromotorische Kraft der Batterie und E′ diejenige einer Normalbatterie. Dann verbinde man E mit einem Galvanometer, an welchem bei einem bestimmten Widerstande des Stromleiters eine Ablenkung von δ_1 Graden hervorgebracht werde; dann schalte man noch den Widerstand r ein, um die Ablenkung auf δ_2 Grade zu reduzieren — etwa 10 Grade weniger als vorher. Nun ersetze man im Stromleiter E durch die Normalbatterie und richte die Widerstände so ein, dass wieder wie vorher die Ablenkung δ_1 beträgt, und vermehre endlich den Widerstand um r', um die Ablenkung auf δ_2 zu reduzieren. Dann ist:

$$r' : r = \mathrm{E}' : \mathrm{E},$$

da die Widerstände, welche die Stromstärke gleichmässig re-

duzieren, den elektromotorischen Kräften proportional sind.

b) Werden die Pole einer Normalbatterie durch einen langen dünnen Draht verbunden, so fällt das Potential gleichmässig vom + Pole bis zum — Pole. Wenn wir daher an dem einen Pole und in einem Punkte, welcher sich in einem beliebigen Abstande auf dem Drahte befindet, Kontakte herstellen, so können wir einen beliebigen Bruchteil der ganzen elektromotorischen Kraft betrachten. Dieser Bruchteil lässt sich mit der elektromotorischen Kraft einer beliebigen andern Batterie vergleichen. Ein überall gleich dicker Draht aus Argentan sei über einer Skala ausgespannt, welche in 2000 gleiche Teile geteilt sein möge. Dann verbinde man ein Normalelement *C* (Fig. 212)

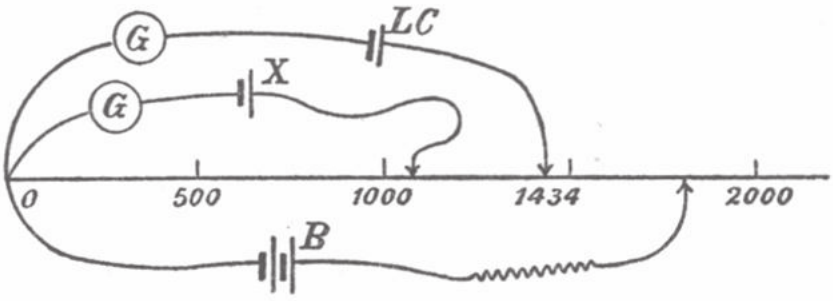


Fig. 212.

mit einem empfindlichen Galvanometer, so dass bei dem Teilstrich 1434 der Skala ein Kontakt stattfindet. Hierauf verbinde man einen Akkumulator oder 2 Daniell-Elemente oder ein Grove'sches Element mit einem Gleitkontakt in einem derart gewählten Punkte, dass dem Normalelement das Gleichgewicht gehalten wird und verbinde das Element X, dessen E.M.K. gemessen werden soll, mit demjenigen Punkte des Drahtes, wo ihm ebenfalls das Gleichgewicht gehalten wird. Angenommen, dies wäre bei dem Teilstrich 1024 der Skala der Fall, so ist seine E.M.K. = 1,024.

c) Wird ein Galvanometer so angefertigt, dass der Widerstand seiner Rollen mehrere 1000 Ohm beträgt, wogegen der innere Widerstand einer Batterie oder einer Dynamomaschine nicht in Betracht kommt, so kann ein solches Galvanometer

dazu dienen, elektromotorische Kräfte zu messen; denn die Stärke des Stromes hängt bloss von der elektromotorischen Kraft an den Enden der Rolle ab (vergl. Art. 215).

d) Ein Kondensator von bestimmter Kapazität wird durch ein Normalelement geladen und hierauf durch ein ballistisches Galvanometer (Art. 213) entladen. Dann wird das Normalelement durch das zu bestimmende Element ersetzt. Die E.M.K. ist der Umdrehung des Galvanometers proportional.

e) Die elektromotorische Kraft einer Batterie kann direkt als Potentialdifferenz durch ein Quadrantelektrometer gemessen werden. In diesem Falle ist der Stromleiter nie geschlossen, und es fliesst kein Strom.

412. Messung des innern Widerstandes einer Batterie. Hierbei kann man in verschiedener Weise verfahren:

a) *Kondensator-Methode.* Wie bei der Methode d) des vorhergehenden Art. beobachte man die Ablenkung des Galvanometers durch den vom Elemente geladenen Kondensator. Dann schalte man einen passend gewählten hohen Widerstand R ein und beobachte eine zweite Ladung und Entladung. Sind d_1 und d_2 die beiden Ablenkungen, so ist der innere Widerstand $= R\,(d_1 - d_2) : d_2$.

b) *Methode der halben Ablenkung.* Man schalte das Element hinter ein Galvanometer vom Widerstande G und einen Widerstandskasten, durch welchen man einen Widerstand R durch Herausziehen eines Stöpsels einschaltet, derart, dass die Ablenkung hinreichend stark ist. Dann vergrössere man den Widerstand des Kastens, bis der Strom nur noch die Hälfte der ursprünglichen Ablenkung hervorbringt. Nennen wir den neu hinzutretenden Widerstand a, so ergiebt sich aus dem Ohm'schen Gesetze, dass der innere Widerstand $= a - (R + G)$ ist. Diese Methode eignet sich bei sehr hohen innern Widerständen.

c) *Methode der Gegenschaltung.* Man nehme zwei gleiche Elemente und vereinige dieselben so, dass sie keinen Strom erzeugen. Dann messe man ihren vereinigten Widerstand in derselben Weise, wie der Widerstand eines Drahtes gemessen wird.

Der Widerstand eines Elementes ist dann die Hälfte des Widerstandes beider.

d) *Mance's Methode.* Man stelle das Element selbst in einen Arm der Wheatstone'schen Brücke und setze an die Stelle, wo die Batterie gewöhnlich ist, einen Schlüssel, richte die Widerstände derart ein, dass die permanente Galvanometer-Ablenkung dieselbe ist, gleichviel ob der Schlüssel herabgedrückt ist oder nicht. Ist diese Bedingung erfüllt, so ist der Widerstand der Batterie aus demjenigen der drei andern Zweige nach der gewöhnlichen Formel zu berechnen. (*Diese Methode ist nicht sehr zuverlässig.*)

e) *Wechselstrom-Methode.* Wird eine grössere Genauigkeit bei der Methode der Gegenschaltung verlangt, so kann man in einen Arm der Wheatstone'schen Brücke die gegengeschalteten Elemente stellen und hier anstatt der gewöhnlichen Batterie die sekundäre Rolle eines kleinen Induktionsapparates (ohne Kondensator) einschalten, und statt eines Galvanometers einen Telephon-Empfänger benutzen. Das Aufhören des Summens im Telephone entspricht der Ablenkung Null. Auf diese Weise vermeiden wir die Störung des Gleichgewichts der gegenwirkenden Elemente, was bei Anwendung kontinuierlicher Ströme nicht der Fall ist. Diese Methode eignet sich auch zur Widerstandsmessung von Flüssigkeiten.

413. Messung der Kapazität. Die Kapazität eines Kondensators lässt sich messen, indem dieselbe mit der Kapazität eines Normal-Kondensators verglichen wird, z. B. mit der Kapazität des $\frac{1}{3}$ Mikrofarad-Kondensators in Fig. 153 — und zwar nach einer der folgenden Methoden:

a) Man lade den Kondensator, dessen Kapazität unbekannt, bis auf ein bestimmtes Potential; dann lasse man einen Teil dieser Ladung auf einen Kondensator von bekannter Kapazität übergehen und messe das Potential, bis auf welches die Ladung sinkt; dann berechne man die ursprüngliche Kapazität, welche sich zu der Gesamt-Kapazität beider Kondensatoren ebenso verhält, wie das letzte Potential zum ursprünglichen.

b) Man lade beide Kondensatoren auf gleiche Potentialdifferenzen und entlade dann einen nach dem andern durch ein ballistisches Galvanometer (Art. 183).

Die Ablenkung der Nadel ist in jedem Falle der Ladung und daher auch der Kapazität proportional.

Das Gesetz des ballistischen Galvanometers heisst:

$$K \cdot V = Q = \frac{H}{G} \cdot \frac{T}{\pi} \cdot \sin \tfrac{1}{2} \alpha,$$

wo Q die elektrische Menge (in C.G.S. Einheiten) bedeutet, H das magnetische Feld, T die Zeit einer ganzen Nadelschwingung, und α den Winkel der ersten Schwingung. Die Grösse $\frac{H}{G}$ lässt sich dadurch eliminieren, dass wir einen konstanten Strom C zirkulieren lassen, welcher die konstante Ablenkung β hervorbringt. Dann ist

$$C = \frac{H}{G} \cdot \tan \beta, \text{ folglich } Q = \frac{C \cdot T \cdot \sin \frac{1}{2} \alpha}{\pi \cdot \tan \beta}.$$

Sind α und β sehr klein, so geht diese Formel über in:

$$Q = \frac{C \cdot T \cdot \alpha}{2\pi \cdot \beta}.$$

Ist C in Ampère ausgedrückt, so bedeutet Q Coulomb.

c) Man bringe die beiden Kondensatoren K_1 und K_2 in zwei Armen einer Wheatstone'schen Brücke an und richte die

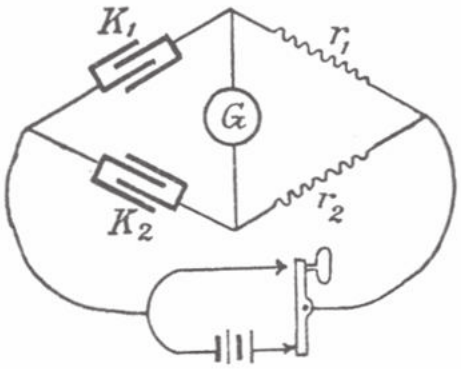


Fig. 213.

Widerstände so ein, dass sich bei der Ladung oder Entladung keine Ablenkung ergiebt (Fig. 213). Dann ist $K_1 : K_2 = r_2 : r_1$; indem die *grössere* Kapazität als *kleinerer* Widerstand wirkt.

d) Zwei Widerstände r_1 und r_2 werden mit dem + und — Pole einer Batterie verbunden. Der Mittelpunkt zwischen r_1 und r_2 wird mit einem der Enden von K_1 und K_2 verbunden. Die freien Enden von K_1 und K_2 werden vorübergehend mit dem + und — Pole der Batterie verbunden und erhalten entgegengesetzte Ladungen. Dann werden sie mit einander verbunden und die Ladungen neutralisieren sich, falls sie von gleicher Grösse sind. Die Widerstände r_1 und r_2 werden so gewählt, dass diese Bedingung erfüllt ist, was man daraus erkennt, dass keine Ablenkung stattfindet, wenn der Schlüssel eines Galvanometer-Stromkreises niedergedrückt wird. Dann ist $K_1 : K_2 = r_2 : r_1$.

e) Eine Stimmgabel kann den Kondensator, da sie nach beiden Seiten schwingt, n mal pro Sekunde laden und entladen, und auf diese Weise V.K.n. Coulomb oder V.K.n. Ampère pro Sekunde ableiten. Der scheinbare Widerstand r dieser Kombination ist 1 : K.n. und lässt sich durch eine Wheatstone'sche Brücke bestimmen. Daher $K = 1 : nr$.

KAPITEL VII.

THERMOELEKTRIZITÄT.

XXXV. VORLESUNG: *Thermoelektrische Ströme.*

414. Im Jahre 1822 machte Seebeck die Entdeckung, dass in einem geschlossenen Stromleiter dadurch ein Strom erzeugt werden kann, dass man einen Berührungspunkt zweier ungleichen Metalle erwärmt. Werden z. B. ein Stück Wismut und ein Stück Antimon zusammengelötet und ihre freien Enden durch ein Galvanometer mit einer Rolle von kleinem Widerstande verbunden und wird alsdann die zusammengelötete Stelle auf eine Temperatur gebracht, welche höher ist als die des übrigen Stromleiters, so fliesst ein Strom durch jene Stelle in der Richtung vom Wismut zum Antimon, wobei die Stromstärke der Temperaturdifferenz proportional ist. Wird die gelötete Stelle auf eine Temperatur abgekühlt, welche niedriger ist, als die des übrigen Stromleiters, so entsteht ein Strom in der entgegengesetzten Richtung. Die hier auftretende elektromotorische Kraft unterhält einen konstanten Strom, so lange die Temperaturdifferenz bestehen bleibt, indem während der ganzen Zeit Wärme absorbiert wird, um die Energie des Stromes zu unterhalten. Solche Ströme heissen **thermoelektrische Ströme,** und die sie erzeugende elektromotorische Kraft ist unter dem Namen *thermo-elektromotorische Kraft* bekannt.

415. Der Peltier'sche Versuch. Im Jahre 1834 beobachtete Peltier eine Erscheinung, welche das Gegenteil der See-

beck'schen Entdeckung ist. Wird von einer Batterie aus ein elektrischer Strom durch die Lötstelle ungleicher Metalle geschickt, so wird jene, wie er fand, entweder erwärmt oder abgekühlt, je nach der Richtung des Stromes. Ein Strom, welcher z. B. in der Richtung vom Wismut zum Antimon fliesst, absorbiert Wärme beim Durchgang durch die Lötstelle dieser Metalle und kühlt dieselbe ab; wogegen ein Strom, welcher durch die Lötstelle vom Antimon zum Wismut fliesst, Wärme entwickelt, so dass die Temperatur der Lötstelle zunimmt.

Wenn Wismut positiv in Bezug auf Antimon ist, so ist klar, dass jeder Strom, welcher vom Wismut zum Antimon fliesst, von der elektromotorischen Kraft an der Lötstelle verstärkt wird, während jeder Strom, der vom Antimon fliesst, eine entgegengesetzte E.M.K. zu überwinden hat. Im letzteren Falle verrichtet der Strom Arbeit und die Lötstelle wird erwärmt. Im ersteren Falle empfängt der Strom Energie auf Kosten der Lötstelle, welche Wärme abgiebt. In Figur 214 repräsentieren die gefie-

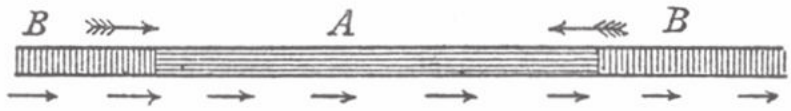


Fig. 214.

derten Pfeile an den Lötstellen die Peltier'schen elektromotorischen Kräfte und die einfachen Pfeile geben die Richtung des Stromes an.

Diese Erscheinung der Erwärmung (oder Abkühlung) durch einen Strom, welcher durch zwei ungleiche, zusammengelötete Metalle fliesst (unter dem Namen des Peltier'schen Versuches bekannt, um dieselbe von der gewöhnlichen Erwärmung eines Stromleiters zu unterscheiden, welcher dem Strome einen Widerstand bietet; letztere Erscheinung bezeichnet man bisweilen als den Joule'schen Versuch), ist gänzlich verschieden von der Wärmeentwicklung in einem Leiter von hohem Widerstande, denn 1) ist der Peltier'sche Versuch *umkehrbar*, indem der Strom je nach seiner Richtung die Lötstelle entweder erwärmt oder abkühlt, wogegen ein Strom, welcher in einem dünnen Drahte

auf Widerstand stösst, denselben stets erwärmt, in welcher Richtung der Strom auch fliesst, und 2) ist die beim Peltier'schen Versuche entwickelte oder absorbierte Wärmemenge einfach der Stromstärke proportional, und nicht dem *Quadrate* derselben, wie dies bei der durch Widerstand entwickelten Wärme der Fall ist.

Das vollständige Gesetz über die in einem Stromleiter entwickelte Wärme muss daher alle Peltier'schen Wirkungen berücksichtigen, die etwa an Metallverbindungen im Stromleiter auftreten. Bezeichnet man mit P die Potentialdifferenz, welche von dem Erwärmen der Lötstelle herrührt, und welche in Bruchteilen eines Volt ausgedrückt ist, so ist das vollständige Wärmegesetz:

$$H = 0{,}24 \cdot (C^2Rt + P \cdot Ct),$$

welches der Leser mit dem Joule'schen Gesetze in Art. 422 vergleichen möge. Die mit P bezeichnete Grösse ist auch als der *Koeffizient des Peltier'schen Versuches* bekannt und hat für verschiedene Metallpaare auch verschiedene Werte; sie ist numerisch gleich der Anzahl von Arbeitseinheiten, welche das mechanische Aequivalent der Wärme sind, welche beim Durchgange eines elektrischen Ampère durch die Lötstelle zweier verschiedener Metalle entwickelt wird.

416. Thermoelektrische Gesetze. Die thermoelektrischen Eigenschaften eines Stromleiters können am besten an dem einfachen Stromleiter in Fig. 215 untersucht werden, welcher ein Wismut - Antimon - Paar darstellt, das durch einen Kupferdraht verbunden ist. Das Volta'sche Gesetz über die vom Kontakt herrührende Potentialdifferenz sagt uns, dass, wenn überall dieselbe Temperatur vorhanden ist, die Potentialdifferenz zwischen Wismut und Kupfer in einer Richtung gleich ist der Summe der Differenzen zwischen Wismut und Antimon, und zwischen Antimon und Kupfer in der andern Richtung, und dass folglich zwischen

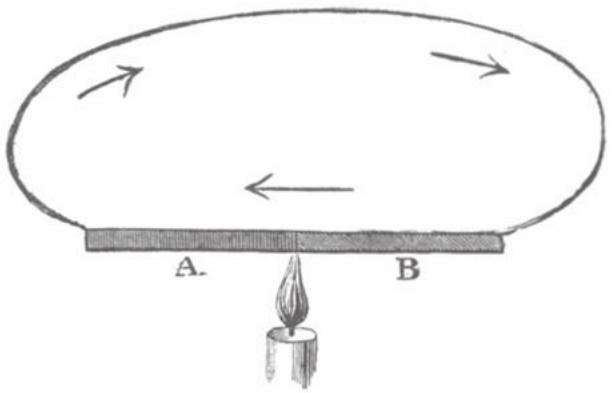


Fig. 215.

den entgegengesetzt gleichen elektromotorischen Kräften Gleichgewicht bestehen würde. Wird jedoch eine Verbindungsstelle erwärmt, so existiert dies Gleichgewicht nicht mehr und das Volta'sche Gesetz verliert seine Giltigkeit. Die neue elektromotorische Kraft, welche an der erwärmten Verbindungsstelle ins Leben tritt, ist nun folgenden Gesetzen unterworfen:

1) *Die thermoelektromotorische Kraft ist für dasselbe Metallpaar dem Temperaturüberschuss der Verbindungsstelle über die Temperatur des übrigen Stromleiters proportional* (selbst für bedeutende Temperaturdifferenzen).

2) *Die totale thermoelektromotorische Kraft eines Stromleiters ist die Summe aller einzelnen thermoelektromotorischen Kräfte an den verschiedenen Verbindungsstellen.*

Aus diesem Gesetze folgt, dass die verschiedenen Metalle sich, wie Seebeck fand, je nach ihrer thermoelektrischen Kraft in eine Reihe derart einordnen lassen, dass jedes vorhergehende Metall zu einem später folgenden (wie Wismut in Bezug auf Antimon) thermoelektrisch positiv ist.

417. Thermoelektrische Kraft. Folgendes ist die **thermoelektrische Reihe** der Metalle, nebst den Potentialdifferenzen (in Mikrovolt), welche sie bei einem Temperaturunterschiede von einem Grad C. zeigen; Blei wird dabei als das normale Nullmetall betrachtet:

+	Wismut	89 bis 97
	Nickel	22
	Argentan . . .	11,75
	Blei	0
	Platin	— 0,9
	Kupfer	— 1,36
	Zink	— 2,3
	Eisen	— 17,5
—	Antimon . . .	— 22,6 bis — 26,4
	Tellur	502
	Selen	800

Ist das Metall nicht ganz rein, so macht dies einen bedeu-

tenden Unterschied in der thermoelektrischen Kraft desselben aus, und einige Legierungen und Schwefelmetalle, wie z. B. Bleiglanz, zeigen bedeutende thermoelektrische Kraft.

Die elektromotorischen Kräfte, welche von der Erwärmung einzelner Metallpaare herrühren, sind in der That sehr klein. Wird die Verbindungsstelle eines Kupfer-Eisen-Paares um 1° C. mehr erwärmt, als der übrige Teil des Stromleiters, so beträgt die elektromotorische Kraft derselben nur 15,14 Mikrovolt. Diejenige des kräftigeren Wismut-Antimon-Paares beträgt für 1° C. ungefähr 117 Mikrovolt.

Die thermoelektrische Kraft ändert sich jedoch mit der Temperatur; beispielsweise ist die des Eisens in Wirklichkeit gleich $-17{,}4 + 0{,}049\,t$ (wo t die mittlere Temperatur der beiden Lötstellen bedeutet). Eisen wird also beim Erwärmen weniger negativ. Für Kupfer hat man $-1{,}36 - 0{,}01\,t$, dasselbe wird also stärker negativ. Es existiert offenbar eine bestimmte Temperatur (oder neutraler Punkt), bei der ihre Kräfte gleich sind.

418. Thermoelektrische Inversion. Cumming machte die Entdeckung, dass für Eisen und andere Metalle bei hohen Temperaturen eine Inversion ihrer thermoelektrischen Eigenschaften stattfinden kann. Bei Kupfer und Eisen bildet die Temperatur von 275° einen neutralen Punkt; bei niedrigeren Temperaturen fliesst der Strom durch die erwärmte Verbindungsstelle vom Kupfer zum Eisen; hat der Stromleiter aber eine höhere Temperatur als 275°, so verhält sich das Eisen in Bezug auf Kupfer thermoelektrisch positiv.

Der neutrale Punkt für Zink-Eisen ist ungefähr 200°. Die Inversion lässt sich leicht dadurch zeigen, dass man zwei lange Streifen dieser Metalle in U-Form zusammennietet, die Verbindungsstelle erwärmt und dann die Wirkung an einem mit ihren andern Enden verbundenen Galvanometer beobachtet. Zuerst beobachtet man eine Ablenkung, welche bis zu einer Temperatur von 200° immer stärker wird, bei noch weiterer Erwärmung nimmt jedoch die Ablenkung wieder ab und wird bei ungefähr 400° entgegengesetzt, ein Beweis, dass jetzt der Strom in entgegen-

gesetzter Richtung fliesst. Fig. 216 zeigt graphisch die Kurven, welche sich bei Eisen-Zink und bei Eisen-Kupfer ergeben, wenn die eine Lötstelle auf 0° erhalten und die andere erwärmt wird. Die punktierte Linie bezieht sich auf Eisen-Zink, wenn die eine Lötstelle auf einer Temperatur von 50° gehalten und die andere erwärmt wird.

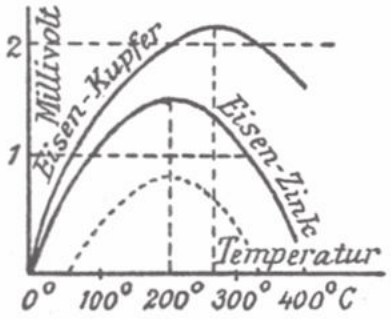


Fig. 216.

419. Thermoelektrisches Diagramm. Die Erscheinungen der Thermoelektrizität lassen sich am besten mit Hilfe der Diagramme untersuchen, welche von Kelvin angegeben und von Professor Tait konstruiert worden sind. In dem Diagramm der Figur 217 stellen die horizontalen Linien Temperaturen vor,

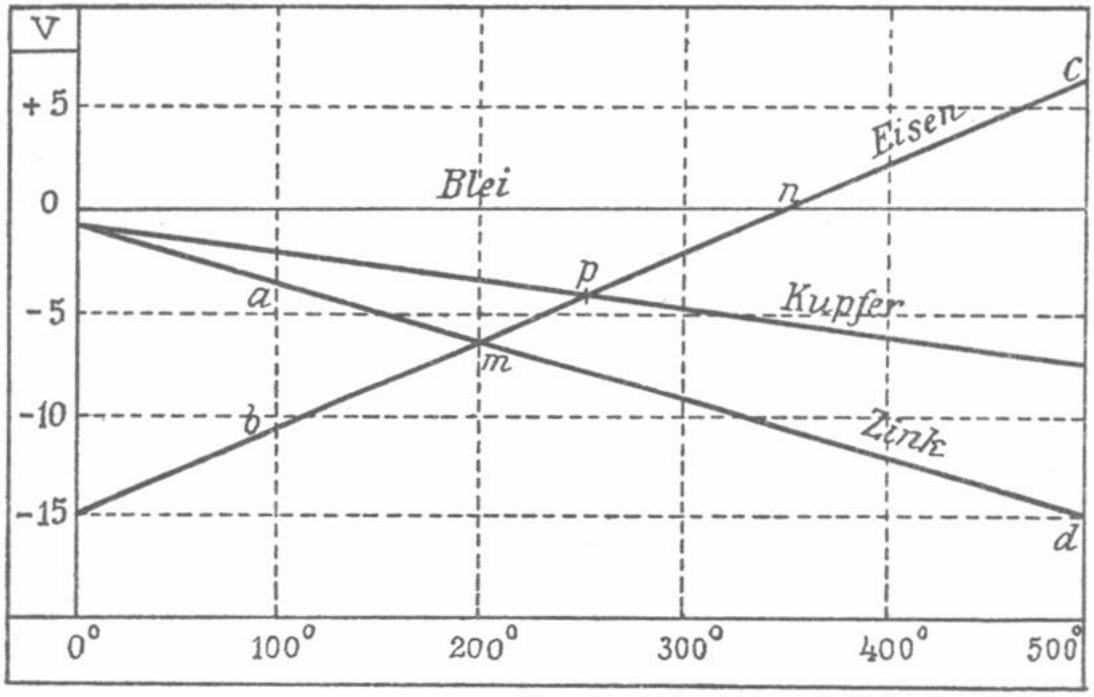


Fig. 217.

und die vertikalen Abstände die Potentialdifferenz in Mikrovolt pro Grad. Bei diesen Differenzen ist Blei zu Grunde gelegt und als Ausgangspunkt genommen, weil warmes Blei bei der Berührung mit kaltem Blei keine wahrnehmbare Potentialdifferenz zeigt, während im übrigen zwischen warmem und kaltem Metall derselben Art eine Potentialdifferenz zu existieren scheint.

Ein Beispiel mag den Nutzen des Diagramm erläutern. Angenommen, wir hätten einen Stromleiter hergestellt, indem wir ein Stück Eisen und ein Stück Kupfer an beiden Enden verbunden hätten; die eine Verbindungsstelle erhalten wir durch schmelzendes Eis auf 0°, die andere durch siedendes Wasser auf 100°. Dann wird die ganze elektromotorische Kraft des Stromleiters durch die Fläche a, 0, -15, b dargestellt. Die Neigung der Linien für die verschiedenen Metalle repräsentiert die oben angeführte Eigenschaft einer elektromotorischen Kraft zwischen verschieden stark erwärmten Teilen desselben Metalls, begleitet von einer Absorption oder Entwicklung von Wärme, wenn der Strom von einer wärmeren zu einer kälteren Stelle desselben Metalls fliesst. Diese Eigenschaft, bekannt unter dem Namen des **Thomson-Effekt** (nach ihrem Entdecker W. Thomson) ist für Eisen das Gegenteil von der für Kupfer oder Zink. Fliesst ein elektrischer Strom von einer warmen zu einer kalten Stelle des Kupfers, so entwickelt er Wärme in dem Kupfer; fliesst er aber von einer kalten nach einer warmen Stelle des Kupfers, so absorbiert er Wärme. Beim Eisen ist es umgekehrt. Die thermo-elektromotorische Kraft eines Paares, dessen Lötstellen die Temperaturen T resp. t haben, und dessen neutraler Punkt die Temperatur n hat, lässt sich durch folgende Formel darstellen:

$$E = p\,(T - t)\left[1 - \frac{T + t}{2n}\right],$$

wo p die in der Tabelle (Art. 417) angegebenen Volt pro Grad bedeutet.

420. Thermoelektrische Säulen. Die E.M.K. eines Wismut-Antimon-Paares beträgt nur 0,0115 Volt, falls die Lötstellen auf 0° und 100° gebracht werden. Um die elektromotorische Kraft des thermoelektrischen Paares zu erhöhen, vereinigt man gewöhnlich eine Anzahl von Metallpaaren (vorzugsweise Wismut und Antimon) zu einer Reihe, derart, dass die alternierenden Verbindungsstellen wie in Fig. 218 in BBB erwärmt werden können, wobei die übrigen Verbindungsstellen bei A kalt bleiben. Die verschiedenen elektromotorischen Kräfte wirken

dann alle in derselben Richtung und der Strom nimmt dann in dem Verhältnis zu, wie die Anzahl der geraden Verbindungsstellen. Kräftige thermoelektrische Batterien hat Clamond angefertigt: eine Eisen-Bleiglanz-Batterie von 120 Paaren, welche

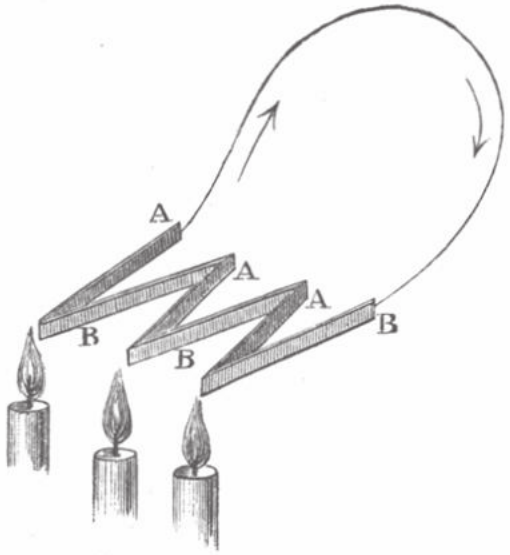


Fig. 218.

einen starken Strom liefern; es ist jedoch äusserst schwierig, sie für längere Zeit in Wirksamkeit zu erhalten, da sie nach fortgesetztem Gebrauche versagen, wahrscheinlich infolge einer permanenten molekularen Veränderung an den Verbindungsstellen. Die **thermoelektrische Säule** des Melloni, welche aus vielen kleinen Paaren von Wismut und Antimon aufgebaut ist, erwies sich als ein vorzügliches elektrisches Thermometer, wenn dieselbe mit einem empfindlichen astatischen Galvanometer mit Rolle von kleinem Widerstand in Verbindung gebracht wurde. Um äusserst geringe Temperaturdifferenzen nachzuweisen, ist die thermoelektrische Säule von grossem Nutzen, da die Ströme der Temperaturdifferenz zwischen den wärmeren Verbindungsstellen auf der einen Seite der Säule und den kalten Verbindungsstellen auf der andern Seite proportional sind. Fig. 219 zeigt die diesem Zweck entsprechende Aufstellung der Thermosäule und des Galvanometers.

Eine noch empfindlichere Vorrichtung, um geringe von strahlender Wärme herrührende Temperaturdifferenzen nachzuweisen, ist die, wo man zwischen den Polen eines kräftigen Magnets einen

geschlossenen Stromleiter aufhängt, der eine Wismut-Antimon-Lötstelle enthält. Sturgeon machte im Jahre 1835 den Vorschlag, ein Thermogalvanometer nach diesem Muster zu konstruieren.

Bei dem Radio-Mikrometer des Vernon Boys (1889) wird eine Drahtschlinge mittelst eines dünnen Quartzfadens zwischen

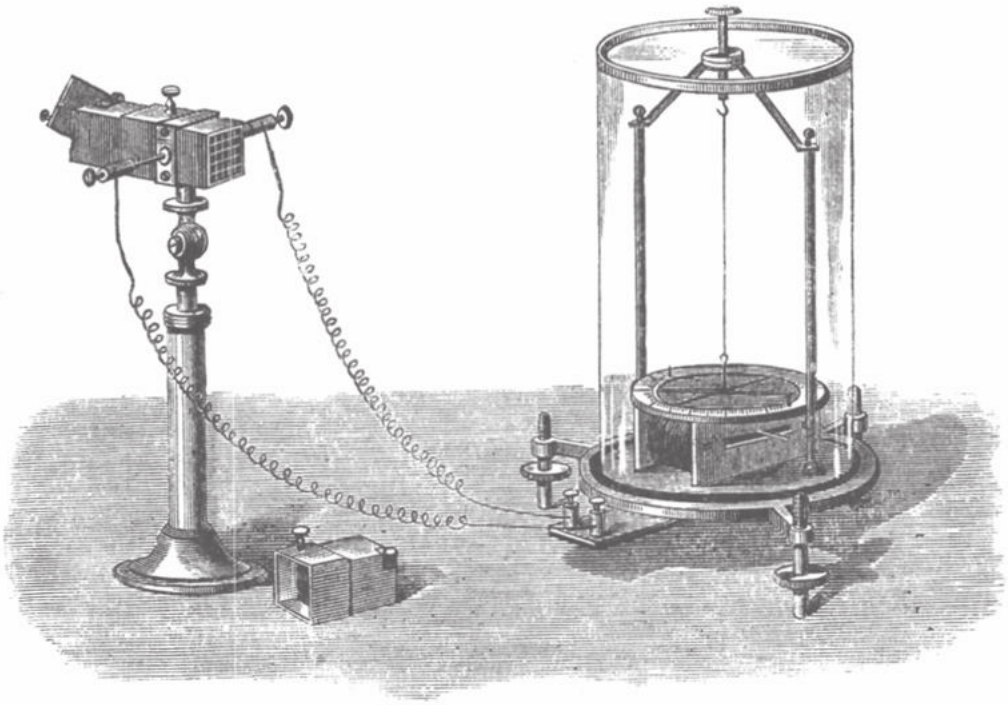


Fig. 219.

den Polen eines Magnets aufgehängt (ähnlich wie die Spule in Fig. 219). Am untern Ende wird der Stromkreis durch ein Stück Antimon und ein Stück Wismut geschlossen, welche an eine dünne Scheibe von Kupferfolie gelötet sind. Eine noch so geringe Temperaturerhöhung der Kupferscheibe (etwa um 1 Milliontel Grad) erzeugt in der Drahtschlinge einen Strom und gibt eine Ablenkung von einem Skalengrad. Mittelst eines solchen Apparates lässt sich die strahlende Wärme einer Kerze noch in einer Entfernung von mehreren Kilometern nachweisen.

KAPITEL VIII.

WÄRME, LICHT UND ARBEIT ERZEUGT DURCH ELEKTRISCHE STRÖME.

XXXVI. VORLESUNG: *Wärmewirkungen der Ströme.*

421. Wärme und Widerstand. Ein Strom kann Arbeit verschiedener Art verrichten, chemische, magnetische, mechanische und Wärmearbeit. Ueberall, wo ein Strom Arbeit verrichtet, wird dieselbe auf Kosten eines Teiles der Energie des Stromes verrichtet. Wir haben gesehen, dass der von einer gegebenen Batterie erzeugte Strom nach dem Ohm'schen Gesetze durch jede Vermehrung des äusseren Widerstandes geschwächt wird. Aber die Stromstärke kann auch in gewissen Fällen durch eine andere Ursache verringert werden, nämlich durch das Auftreten einer entgegengesetzt gerichteten elektromotorischen Kraft an irgend einer Stelle des Stromleiters. Wenn z. B. ein Strom durch ein Voltameter hindurchgeht (Art. 232), so tritt infolge der entgegengesetzt gerichteten elektromotorischen Kraft (»Polarisation«), welche entsteht, während die chemische Arbeit verrichtet wird, eine Schwächung ein. Ebenso, wenn ein Strom dazu benutzt wird, einen elektrischen Motor (Art. 438) zu treiben, erzeugt die Rotation des Motors selbst einen rückwärts gehenden Strom, welcher die Stromstärke vermindert. Jeder Strom jedoch, welcher auf diese Weise nicht zur äusseren Arbeit verwendet wird, *wird in Wärme umgesetzt*, sei es innerhalb der Batterie, oder in

einem Teile des Stromleiters oder in beiden. Nehmen wir an, eine Elektrizitätsmenge würde in einem geschlossenen Stromleiter in Bewegung gesetzt. Wäre kein Widerstand vorhanden, der sie hemmte, so würde dieselbe für ewige Zeiten zirkulieren, gerade so wie ein Eisenbahnwagen, der längs eines kreisförmigen Schienenstrangs in Bewegung gesetzt ist, ohne Aufhören im Kreise herumfahren würde, wenn derselbe nicht infolge der Reibung zur Ruhe käme. Wenn ein in Bewegung befindlicher Körper infolge der Reibung gehemmt wird, so wird die Energie seiner Bewegung durch die Reibung in Wärme umgesetzt. Wenn eine in Bewegung befindliche Elektrizitätsmenge durch einen Widerstand gehemmt wird, so wird die Energie ihrer Bewegung durch den Widerstand in Wärme umgesetzt. Wärme tritt in der That überall da auf, wo der Stromleiter dem Strome einen Widerstand entgegenstellt. Werden die Enden einer Batterie durch einen kurzen, dicken Draht von geringem Widerstande verbunden, so wird der grösste Teil der Wärme in der Batterie entwickelt; wird aber ein dünner Draht von bedeutendem Widerstande in den äusseren Stromleiter eingeschaltet, so erwärmt sich derselbe, während die Batterie selbst verhältnismässig kühl bleibt.

422. Gesetze der Wärmeentwicklung; das Joule'sche Gesetz. Um die Wärmeentwicklung durch einen Strom zu untersuchen, verwendeten Joule und Lenz Apparate wie in Fig. 220, bei denen ein dünner, zwei dicke Leiter verbindender Draht sich innerhalb eines mit Alkohol gefüllten Glasgefässes befindet, in welches ein Thermometer taucht. Da der Widerstand des Drahtes bekannt ist, so kann sein Verhältnis zu den andern Widerständen berechnet werden. Joule fand, dass *die Zahl der Wärmeeinheiten, welche in einem Leiter entwickelt werden, proportional ist:*

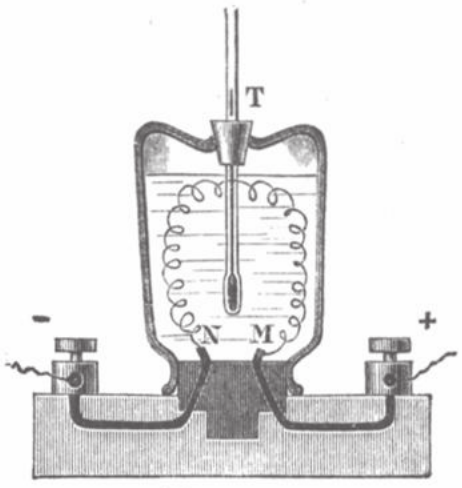


Fig. 220.

1) seinem Widerstande;

2) dem Quadrate der Stromstärke; und

3) der Zeit, während welcher der Strom fliesst.

Die Gleichung, welche diese Beziehungen ausdrückt, ist unter dem Namen des Joule'schen Gesetzes bekannt und lautet

$$U = C^2 . R . t \times 0{,}24,$$

wo C die Stromstärke in Ampère, R den Widerstand in Ohm, die Zeit in Sekunden und U die Wärme in Kalorien bedeuten, nämlich diejenige Wärmemenge, welche ein Gramm Wasser um 1° C. erwärmt (Art. 276).

Diese Gleichung sagt aus, dass *ein Strom von 1 Ampère, der durch einen Widerstand von 1 Ohm fliesst, hierin 0,24 Kalorien pro Sekunde entwickelt.* Der Beweis dieses Satzes findet sich in Art. 434. Die Wärme, welche auf diese Weise in einem Widerstande durch Abnahme der Energie erzeugt wird, heisst bisweilen *Ohm-Wärme* zum Unterschiede von der umkehrbaren Peltier-Wirkung (Art. 415).

Die elektrische Wärmeeinheit, das Joule, beträgt nur 0,24 einer gewöhnlichen Wärmeeinheit oder einer Kalorie, und eine Kalorie ist gleich 4,2 Joule.

Das zweite der obigen Gesetze, dass die Wärme unter sonst gleichen Verhältnissen dem *Quadrate* der Stromstärke proportional ist, erscheint dem Anfänger anfangs sonderbar, welcher erwartet, dass die Wärme der einfachen Stromstärke proportional sei. Dabei sei daran erinnert, dass der Verbrauch des Zinks ebenfalls dem Quadrate des Stromes proportional ist. Angenommen, wir verdoppeln den Strom, welcher sich durch einen grossen Widerstand durcharbeitet (so dass alle Wärme ausserhalb der Batterie entwickelt wird) dadurch, dass wir die Zahl der Elemente verdoppeln, so wird in jedem Elemente doppelt so viel Zink konsumiert, wie vorher, und da wir zweimal so viel Elemente haben, ist der Verbrauch des Zinks *4 mal* so gross wie vorher.

423. Favre's Versuche. Favre stellte eine Reihe von äusserst wichtigen Versuchen an über das Verhältnis der Energie eines Stromes zu der von ihm entwickelten Wärme. Er wies nach, dass die Anzahl der entwickelten Wärmeeinheiten = 18,682,

wenn 33 Gramm (1 Aequivalent) Zink in verdünnter Schwefelsäure aufgelöst werden (aus welcher Wasserstoff ausgeschieden wird). Er gelangte zu dieser Zahl, indem er den Prozess sich in einem Gefässe vollziehen liess, welches sich in einer Höhlung seines Calorimeters befand, eines Apparates, der einem sehr grossen mit Quecksilber gefüllten Thermometer glich, dessen Ausdehnung der ihm mitgeteilten Wärme proportional war. Wurde ein Smee'sches Element in denselben Apparat eingeführt, so beobachtete er, dass die Auflösung derselben Zinkmenge von der Entwicklung von 18,674 Wärmeeinheiten begleitet war (also einer mit der früher beobachteten Menge fast gleichen) und diese Menge war dieselbe, gleichviel ob die Entwicklung in dem Elemente der Batterie stattfand, wenn der Stromkreis durch einen kurzen, dicken Draht geschlossen war, oder ob dieselbe in einem langen, dünnen Drahte stattfand, der in den äussern Stromkreis eingeschaltet war. Er stellte alsdann 5 Smeesche Elemente hinter einander, in Hohlräume des Calorimeters und sandte ihren Strom um eine kleine elektromagnetische Maschine. Die während der Auflösung von 33 Gramm Zink sich entwickelnde Wärmemenge wurde dann in 3 Fällen beobachtet: 1) wenn die Maschine in Ruhe war; 2) wenn die Maschine in Bewegung war, jedoch weiter keine Arbeit verrichtete, als dass sie die Reibung an ihren Achsen überwand; 3) wenn die Maschine dazu benutzt wurde 13,124,000 Gramm-Zentimeter (= $12{,}874 \times 10^6$ Erg) Arbeit zu verrichten, indem sie ein Gewicht an einer über eine Rolle führenden Schnur emporhob. Die Wärmemengen, welche in dem Stromleiter in diesen 3 Fällen entwickelt wurden, waren 18,667; 18,657 und 18,374 Einheiten. Im letzten Falle erklärt sich die Abnahme der im Stromleiter erzeugten Wärme durch die verrichtete Arbeit. Addieren wir das Wärmeäquivalent der verrichteten Arbeit zu der im letzten Falle entwickelten Wärmemenge, so müssten wir denselben Wert, wie vorher, erhalten. Indem wir die $12{,}874 \times 10^6$ Erg der Arbeit durch das mechanische Wärmeäquivalent dividieren, ausgedrückt in »absolutem« Maße (42×10^6), so erhalten wir als das Wärme-

äquivalent der verrichteten Arbeit 306 Wärmeeinheiten. Nun ist $18{,}374 + 306 = 18{,}680$ eine Grösse, welche mit derjenigen der ersten Beobachtung fast identisch ist und vollständig innerhalb der Grenzen unvermeidlicher experimenteller Fehler liegt.

424. Temperaturerhöhung. Die Erhöhung der Temperatur eines Widerstand leistenden Drahtes hängt von der *Natur* des Widerstandes ab. Ein kurzer dünner Draht kann genau so grossen Widerstand bieten als ein langer dicker Draht. Beide haben die Entwicklung derselben Zahl von Wärmeeinheiten zur Folge, aber im ersten Falle wird der Draht sehr warm, da die Wärme zur Erhitzung eines kurzen dünnen Drahtes von geringer Masse verwandt wird, wogegen im zweiten Falle die Masse des langen dicken Drahtes vielleicht nur bis zu einem nicht merkbaren Grade erwärmt wird. Wiegt der Draht w Gramm und hat derselbe die spezifische Wärmekapazität s, so ist $U = s \cdot w \cdot \theta$, wo θ die Temperaturzunahme in (hundertteiligen) Graden bedeutet. Folglich:

$$\theta = 0{,}24 \times \frac{C^2 R t}{sw}.$$

Da der Widerstand der Metalle bei steigender Temperatur zunimmt, so leistet ein dünner, durch den Strom erwärmter Draht grössern Widerstand und erwärmt sich immer mehr, bis das Verhältnis des Wärmeverlustes durch Leitung und Ausstrahlung in die umgebende Luft dem Verhältnis der Wärmezufuhr durch den Strom gleichkommt.

Der folgende hübsche Versuch illustriert die Gesetze der Erwärmung. Der Strom einiger Elemente wird durch eine Kette geschickt, welche abwechselnd aus Gliedern von Silber- und Platindraht besteht. Die Platinglieder sind rotglühend, während die Silberglieder verhältnismässig kühl bleiben. Dies erklärt sich daraus, dass der spezifische Widerstand des Platins ungefähr 6 mal grösser ist als der des Silbers und seine Wärmekapazität ungefähr halb so gross; folglich ist die Temperaturzunahme in Drähten von gleicher Dicke, durch welche derselbe Strom fliesst, für Platin annähernd 12 mal grösser als für Silber.

Dünne Drähte erwärmen sich viel schneller als dicke, da *die Temperaturzunahme in verschiedenen Teilen desselben Drahtes (welchen derselbe Strom durchfliesst) bei verschiedenen Dicken, der vierten Potenz des Durchmessers umgekehrt proportional ist.*

Nehmen wir z. B. an, dass ein Draht an einer beliebigen Stelle auf die Hälfte seines Durchmessers reduziert wird, so hat der Querschnitt eine Fläche, welche den vierten Teil von derjenigen am dickern Ende beträgt. Der Widerstand ist hier 4mal grösser, und die Anzahl der entwickelten Wärmeeinheiten ist 4mal so gross wie in einer gleichen Länge des dickern Drahtes. Aber das 4fache der Wärmemenge, auf $\frac{1}{4}$ der Metallmasse verwendet, erwärmt dasselbe 16 mal stärker. Je wärmer nun ein Körper wird, desto stärker strahlt er Wärme an seine Umgebung aus. Bei Drähten aus gegebenem Material ist der Strom, welcher erforderlich ist, sie auf gleiche Temperatur zu bringen, der Quadratwurzel aus der dritten Potenz des Durchmessers proportional. Nach dieser Regel bestimmt man die Dicke des Drahtes, der beim elektrischen Lichte als Sicherheitsschmelzer benutzt wird. Dieselben bestehen aus Zinndrähten, welche in den Stromkreis eingeschaltet werden, damit sie zum Schmelzen gelangen, wenn der Strom etwa übermässig stark werden sollte.

425. Cardew's Voltmeter. Fliesst der Strom durch einen langen dünnen Platindraht, welcher zwei Punkte eines Stromkreises mit einander verbindet, so lässt sich durch denselben die Potentialdifferenz zwischen diesen beiden Punkten messen. Infolge seiner Erwärmung dehnt er sich aus und diese Ausdehnung setzt einen Zeiger in Bewegung, welcher über einer graduierten Scheibe spielt, so dass Ablesungen in Volt möglich sind. (Fig. 221.)

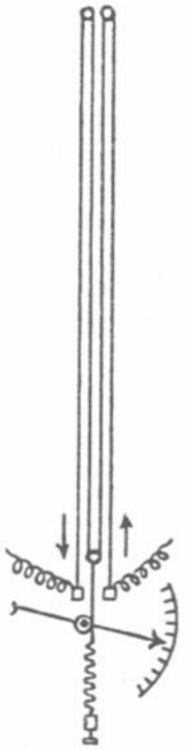


Fig. 221.

426. Für chirurgische Zwecke wird bisweilen ein dünner Platindraht, der von einem Strome bis zur Weissglühhitze erwärmt wird, statt eines Messers ver-

wendet, wie z. B. bei der Operation der Amputation der Zunge beim Zungenkrebs. Platin wählt man wegen seiner schweren Schmelzbarkeit, doch selbst Platindrähte werden durch einen zu starken Strom geschmolzen. Von den Leitern widersteht die Kohle allein dem Schmelzen.

427. Sprengungen durch Elektrizität. Infolge dieser Wärmewirkungen lässt sich die Elektrizität dazu verwenden, um Minen in Brand zu stecken, indem starke leitende Drähte von einer geeigneten Batterie aus grösserer Entfernung nach einem besondern *Zünder* geführt werden, bei welchem ein sehr dünner Platindraht in den Stromleiter eingeschaltet ist. Dieser Draht erwärmt sich, wenn der Strom fliesst, und da er an einer leicht brennbaren Masse liegt und so als Zünder dient, so zündet er diese an und lässt die Pulverladung explodieren. Torpedos können auf diese Weise unter dem Wasser in beliebiger Entfernung von der Batterie gesprengt werden.

428. Zusammenschweissen durch Elektrizität. Werden zwei Drähte oder Metallstäbe mit hinreichend starkem Druck gegen einander gehalten und schickt man dann einen kräftigen Strom hindurch, so entwickelt sich an der Verbindungsstelle eine bedeutende Wärme, so dass die Stäbe schmelzen und zusammengeschweisst werden. Diese Methode hat Elihu Thomson weiter ausgebildet, welcher zu diesem Zwecke Wechselstrom-Transformatoren (Art. 475) verwertete und bei einer Potentialdifferenz von wenigen Volt Ströme von mehreren 100 Ampère erzeugte. Eine eigentümliche Erscheinung beobachtet man, wenn zwei Eisenstäbe mit den Polen einer kräftigen Batterie von einigen 50 Volt verbunden und dann in Wasser getaucht werden. Der als Kathode dienende Stab überzieht sich alsdann mit einer glänzenden Schicht und wird augenblicklich rotglühend. Guthrie, welcher diese Erscheinung im Jahre 1876 zuerst untersuchte, schrieb die Erwärmung dem Widerstande einer Wasserstoffschicht zu. Neuerdings hat man hierauf eine neue Methode des Zusammenschweissens basiert.

429. Kochen durch Elektrizität. Nachdem die Ab-

gabe von Elektrizität allgemein eingeführt ist, sind elektrische Oefen, Kochapparate etc. Handelsartikel geworden. Die Erwärmung wird dadurch bewerkstelligt, dass man den Strom durch Widerstand leistende Drähte schickt, welche von Zement oder andern geeigneten Isolatoren umgeben sind.

XXXVII. VORLESUNG: *Elektrische Energie: Zufuhr und Messung derselben.*

430. Elektrische Energie. Ein elektrischer Strom führt Energie von einer Batterie oder einer Dynamo nach irgend einer andern Stelle des Schliessungsbogens, wo dieselbe wieder in Arbeit umgesetzt wird, in mechanische, chemische oder thermische. Es soll jetzt untersucht werden, wie diese elektrische Energie erzeugt oder transformiert wird.

Kraft ist angesammelte oder verbrauchte Energie. Dieselbe kann in Fusspfunden oder in Erg pro Sekunde angegeben werden. James Watt nahm an, dass die durchschnittliche Arbeit eines Pferdes 550 Fusspfund pro Sekunde beträgt. Da 1 Fuss = 30,48 cm und 1 Pfund = 453,6 g . 981 = 445,000 Dyn ist, so beträgt eine Pferdekraft 7,460,000,000 Erg pro Sekunde (oder $746 . 10^7$).

Wird eine elektrische Menge Q durch eine Potentialdifferenz V bewegt, so folgt aus der Definition des Art. 258, dass die geleistete Arbeit gleich Q . V ist. Geschieht dies bei einer Batterie oder einer Dynamo, so repräsentiert Q . V die chemische oder mechanische Arbeit, welche an dem System verrichtet wird, oder die von dem System angesammelte Energie. Nehmen wir an, dass dies in der Zeit t geschehen ist, so ist $\frac{Q . V}{t}$ das Verhältnis, in welchem die Energie dem Schliessungsbogen mitgeteilt worden ist. Nach Art. 157 ist aber $\frac{Q}{t} = C$; folglich ist die dem Stromleiter mitgeteilte Kraft $= C . V$.

Dies rechtfertigt den Satz, dass die Kraft eines elektrischen Stromes, womit derselbe nützliche Arbeit verrichtet, sei es beim

Beleuchten, oder beim Erhitzen oder bei mechanischen Wirkungen, *proportional ist sowohl der Stromstärke als auch der ihn treibenden elektromotorischen Kraft.* Mit andern Worten: Kraft ist sowohl den Ampère als auch den Volt proportional. In ähnlicher Weise ist die Kraft einer Dampfmaschine nicht allein der benutzten Dampfmenge, sondern auch dem Drucke proportional, unter welchem der Dampf zugeführt wird. Die elektrische Krafteinheit ist die Kraft eines Stromes von 1 Ampère, der durch einen elektrischen Druck von 1 Volt getrieben wird. Diese Einheit heisst Volt-Ampère oder Watt.

Da 1 Volt $= 10^8$ absoluten Einheiten der E.M.K. und 1 Ampère $= 10^{-1}$ absoluten Stromeinheiten ist (Art. 349), so folgt, dass 1 Watt $= 10^7$ absoluten Krafteinheiten ist (d. h. 10^7 Erg pro Sekunde). Nun ist aber eine Pferdekraft $= 746 \cdot 10^7$ Erg pro Sekunde, folglich auch $= 746$ Watt. Unter einem Kilowatt versteht man 1000 Watt. Dasselbe ist annähernd gleich $1\frac{1}{3}$ Pferdekräften.

Um die Anzahl Watt zu bestimmen, welche eine Dynamo oder eine Batterie zuführen, multipliziere man die Anzahl der Ampère mit der Anzahl der Volt, durch welche der Strom getrieben wird. Dieselbe Regel dient auch dazu, um die Kraft zu berechnen, welche auf elektrischem Wege an einen Motor, eine Lampe, einen Akkumulator etc. abgegeben wird.

B e i s p i e l. Wird ein Strom von 20 Ampère einer grossen Bogenlampe unter einem Druck von 56 Volt zugeführt so beträgt die Grösse der dabei absorbierten Kraft 1120 Watt oder $1\frac{1}{2}$ Pferdekräfte.

431. Aufnahme und Abgabe der Kraft. Bei jeder Batterie, Dynamo oder Thermosäule wird Kraft in den elektrischen Schliessungsbogen aufgenommen. Bei jedem Motor, jeder Lampe oder irgend einer Stelle des Stromkreises, wo chemische Arbeit verrichtet wird (elektrische Versilberung, Gaszersetzung, oder Laden von Akkumulatoren) oder an jeder Stelle, wo Wärme entwickelt wird, wird von dem elektrischen Stromkreise Kraft abgegeben. Ueberall, wo Energie in den Stromkreis aufge-

nommen wird, ist eine E.M.K. *in derselben Richtung* wie der Strom vorhanden, welche denselben treiben hilft. Ueberall, wo Energie vom Stromkreise abgegeben wird, ist eine E.M.K. vorhanden, welche dem Strome entgegengesetzt gerichtet ist [1]).

Der Ausdruck Abgabe, in Anwendung auf Dynamomaschinen u. s. w., bezeichnet die Anzahl Watt oder Kilowatt, welche die Maschine leistet oder leisten kann. Wenn z. B. eine Dynamo 300 Ampère bei 100 Volt abgeben kann (d. h. bei einer disponibelen E.M.K. von 100 Volt), so schreibt man derselben eine Abgabe von 30 Kilowatt zu.

432. Kraftmessung. Um die Kraft zu messen, welche auf elektrischem Wege einem Teile *ab* eines Stromkreises von einem konstanten Strome abgegeben wird, genügt es, den Strom mit einem Ampèrometer (Art. 216) und die Potentiale längs jenes Teiles mit einem Voltmeter (Art. 215, 285) zu messen, wobei dieser natürlich als Nebengeleis wie in Fig. 222 geschaltet ist. Das Produkt der Volt und Ampère giebt die Watt. Auch lässt sich ein Wattmeter wie folgt benutzen.

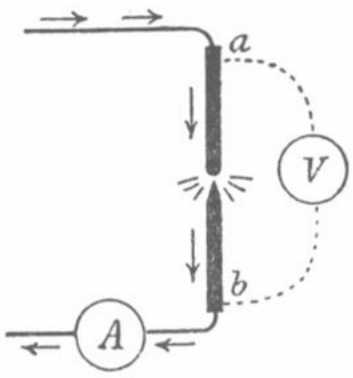


Fig. 222.

433. Wattmeter. Das Produkt der Ampère und Volt lässt sich direkt mit Hilfe eines Wattmeters bestimmen. Mit diesem Namen bezeichnet man eine besondere Form des Elektrodynamometers (Art. 389), bei welchem die festen und beweglichen Rollen zwei besondere Stromkreise bilden, von denen

1) In der Mechanik haben wir etwas ähnliches bei der Kraftübertragung von einer Rolle zur andern mittelst eines Treibriemens. Die Wirkung der treibenden Rolle hat dieselbe Richtung wie die Bewegung des Treibriemens. Die Wirkung bei der getriebenen Rolle ist der Bewegung entgegengesetzt gerichtet. Dieser Fundamentalsatz erklärt die rückwärts gerichteten E.M.K., welche bei Motoren und Akkumulatoren beim Laden auftreten. Daher wissen wir (Art. 161), dass der Sitz der hauptsächlichen E.M.K. bei einem Volta'schen Elemente an der Oberfläche des Zinks ist und dass Wismut (Art. 417) in thermo-elektrischer Beziehung positiv in Bezug auf Antimon ist.

der eine ein dicker Draht von geringem Widerstande ist, welcher die Ampère führt, während der andere ein dünner Draht von hohem Widerstande ist, um einen den Volt entsprechenden Strom aufzunehmen. Der letztere Stromkreis ist als Nebengeleis mit demjenigen Teile *ab* des Schliessungsbogens zu verbinden, bei welchem die zugeführte Kraft gemessen werden soll. In Fig. 223 ist der Teil *ab* eine Bogenlampe. Der Hilfswiderstand *r* wird in den Stromkreis mit dünnem Drahte eingeschaltet, indem der gesamte Strom durch den Stromkreis mit dickem Drahte fliesst.

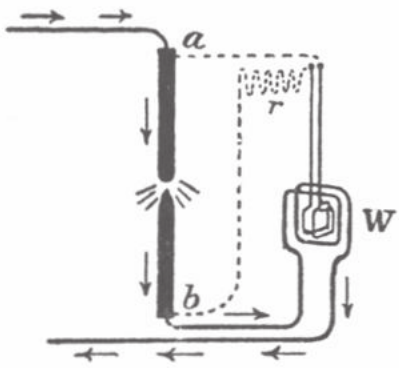


Fig. 223.

Wattmeter werden sowohl nach dem Muster der Siemens'schen Dynamometer (Art. 390) angefertigt, als auch nach dem Muster der Kelvin'schen Wagen (Art. 391).

Wenn Kraftmessungen bei Wechselströmen angestellt werden sollen, so hat man nicht, wie in Art. 432, besondere Apparate zur Volt- und Ampère-Messung anzuwenden. Denn infolge der Phasendifferenzen (Art. 467) zwischen Volt und Strom sind die scheinbaren Watt, welche sich durch Multiplizieren der einzelnen Ablesungen ergeben, grösser als die wirklichen durch einen Wattmeter gemessenen Watt.

434. Kraft, welche beim Erwärmen verloren geht. Wird ein Strom C durch den Widerstand R getrieben, so ist nach dem Ohm'schen Gesetze die dazu erforderliche Anzahl der Volt:

$$V = C \,.\, R.$$

Die auf diese Weise verbrauchte Kraft hat keinen weitern Erfolg, als den Widerstand zu erwärmen. Ersetzen wir V durch den angegebenen Wert, so ergiebt sich:

$$\text{Verbrauche Watt} = C \,.\, V = C^2 \,.\, R = \frac{V^2}{R}.$$

Dauert demnach der Verbrauch *t* Sekunden, so beträgt die in Wärme verwandelte Energie:

$$\text{Energie} = Q \,.\, V = C \,.\, t \,.\, V = C^2 \,.\, R \,.\, t.$$

Die Netto-Kraft einer Dynamomaschine oder einer Batterie ist immer geringer als ihre Totalkraft, infolge des innern Widerstandes. Ist letzterer $= r$, und E die gesamte elektromotorische Kraft, so ist $V = E - C \,.\, r$ die Anzahl der Netto-Volt. Die Totalkraft beträgt E . C Watt, dagegen die Nettokraft $V \,.\, C = E \,.\, C - C^2 r$. Daher sind die zur Verfügung stehenden Watt gleich den im ganzen erzeugten Watt, vermindert um die bei der innern Erwärmung verbrauchten Watt.

Um das Joule'sche Wärmegesetz (Art. 422) zu beweisen, sei daran erinnert, dass das mechanische Wärmeäquivalent 42 Millionen Erg beträgt, d. h. $W = J \,.\, U$, wo W die in Erg ausgedrückte Arbeit ist, U die Wärme in Kalorieen, und $J = 4{,}2 \,.\, 10^7$. Folglich ist $U = \frac{C^2 R \,.\, t}{J}$. Um jedoch die Arbeit auf Erg zu reduzieren, müssen wir $C^2 R \,.\, t$ mit 10^7 multiplizieren. Folglich $U = C^2 \,.\, Rt \,.\, 0{,}24$.

435. Abgabe der elektrischen Energie. Elektrische Energie wird jetzt im grossen Maßstabe zu Beleuchtungs- und Heizungszwecken, sowie als bewegende Kraft abgegeben. Grosse *Zentralstationen* werden an geeigneten Orten erbaut mit Dampfmaschinen oder Turbinen (falls Wasserkräfte zur Verfügung stehen), um Dynamomaschinen oder Wechselstrommaschinen zu treiben. Von der Zentralstation gehen starke Kupferdrähte aus, welche in das Netzwerk der Konduktoren einmünden, die von Haus zu Haus gehen.

Die Zufuhrsysteme sind verschieden, je nachdem mit niedriger Spannung operiert wird, d. h. mit 100—300 Volt, oder mit hoher Spannung, d. h. mit 300—3000 Volt, oder mit extra hoher Spannung, d. h. mit mehr als 3000 Volt. Die Systeme mit niedriger Spannung benutzen in der Regel Gleichströme, die mit hoher Spannung benutzen meist (doch nicht notwendig) Wechselströme und Transformatoren (Art. 475), um an der Verbrauchsstelle auf niedrige Spannung zu transformieren.

Da die Kraft eines Stromes von der Spannung abhängt,

mit welcher er geliefert wird, so basiert die gesetzlich anerkannte *Zufuhreinheit* auf der Krafteinheit, dem Watt (Art. 430) und wird definiert als 1000 Watt, geliefert für eine Stunde.

436. Bedingungen der elektrischen Zufuhr. Elektrische Energie wird fast immer unter einer der beiden Bedingungen geliefert, entweder

a) bei konstanten Volt, oder

b) mit konstantem Strome.

Im ersten Falle ist der Stromleiter verzweigt, und der Strom wird (gewöhnlich bei 100 Volt) allen Lampen oder Motoren *parallel* zugeführt (Art. 404), wobei jede Lampe u. s. w. von allen andern unabhängig ist und der Strom genau im Verhältnis zum Anspruch reguliert wird.

Im zweiten Falle, welcher selten eintritt, ausgenommen bei Reihen von Bogenlampen, ist der Stromleiter unverzweigt, und der Strom (gewöhnlich 10 Ampère) fliesst durch alle Lampen in Serien (Art. 163). Werden Lampen ausgeschaltet, so hat man die Anzahl der Volt zu vermindern, damit der Strom konstant bleibt.

437. Zufuhrmaße. Es giebt verschiedene Arten von Maßen, um die Zufuhr an die Konsumenten zu messen.

a) *Chemische Maße.* Der Strom oder ein bekannter Bruchteil desselben wird durch einen elektrolytischen Becher geführt, um dort Kupfer abzusetzen (Edison's Methode) oder Zink aufzulösen (Jehl's verbesserte Methode). Die Grösse der chemischen Wirkung ist den Ampère-Stunden proportional,

b) *Integrationsmaße.* Eine gleichförmig gehende Uhr treibt ein Zählwerk vermittelst einer Hebelvorrichtung, die durch den Strom in Thätigkeit versetzt wird, und zwar in der Weise, dass, wenn der Strom schwach ist, das Zählwerk nur wenig weiter bewegt wird, dagegen schneller, wenn der Strom stark ist. Ein Integrator mit Scheibe und Walze oder ein Wellbaumintegrator sind die gebräuchlichsten Mechanismen, deren Bewegungen durch die Bewegung eines Ampèremeters bestimmt werden.

c) *Motormaße.* Geht der Strom durch die Armatur eines

kleinen Motors (Art. 438), welcher ein konstantes Feld hat, so ist seine Geschwindigkeit in jedem Augenblicke dem Strome proportional. Daher kann ein solcher Motor, falls er in geeigneter Weise mit einem Räder-Zählwerk verbunden wird, als Elektrizitätsmesser dienen, wobei die gesamte Anzahl der Umdrehungen den Ampèrestunden proportional ist. Bei dem Messer von Perry (1893) besteht der rotierende Teil aus einer kupfernen Glocke, welche in Quecksilber taucht und welche um einen zentralen Magnetpol rotiert (vergl. Fig. 195). Dieselbe ist von einem äussern S-Pol umgeben, welcher gerippte Ausläufer trägt, um die Wirbelströme zu befördern. Bei dem Schallenbergerschen Maße für Wechselströme treibt der Motor einen Fächer. Bei dem Messapparate von Elihu Thomson, welcher die Watt-Stunden verzeichnet, besteht die rotierende Armatur aus dünnem Drahte von grossem Widerstande, welcher als Nebengeleis verbunden ist, während die festen als Feld-Magnet dienenden Rollen den gesamten zugeführten Strom aufnehmen. Dann ist das Drehungsmoment den Watt proportional. Eine Kupferscheibe rotiert zwischen Magnetpolen und erhält die Geschwindigkeit dem Drehungsmomente proportional.

d) *Gehemmte Uhren.* Man kann den Strom auf den Gang einer Uhr einwirken lassen, indem man ihn in eine Rolle unter der magnetisierten Pendellinse einströmen lässt. Eine Kraft, welche auf diese Weise die Schwerkraft unterstützt oder z. T. aufhebt, hat zur Folge, dass die Uhr schneller oder langsamer geht. Ayrton und Perry machten den Vorschlag, die elektrische Zufuhr durch die Anzahl der Stunden zu bestimmen, welche eine Uhr vor- oder nachgeht. Der Aron'sche Elektrizitätszähler, welcher auf diesem Prinzipe beruht, hat eine doppelte Uhr mit 2 Pendeln, von denen nur das eine durch den Strom beeinflusst wird. Ein Getriebe von Zählrädern wird durch eine Hebelvorrichtung in Bewegung gesetzt und verzeichnet die Differenz zwischen beiden Uhren.

XXXVIII. VORLESUNG: *Elektromotoren. (Elektromagnetische Maschinen.)*

438. Elektromotoren. Elektromagnetische Maschinen oder Elektromotoren sind solche Maschinen, bei denen die bewegenden Kräfte von elektrischen, auf Elektromagnete wirkenden Strömen herrühren. Im Jahre 1821 zeigte Faraday einen einfachen Fall der Rotation, welche von einem Magnet und einem elektrischen Strome erzeugt wurde. Barlow erzeugte Rotation bei einem Sternrade, und Sturgeon bei einer Kupferscheibe, wenn dieselbe längs des Radius von einem Strome durchflossen wurde und sich dabei zwischen den Polen eines Hufeisenmagnets befand. Im Jahre 1831 konstruierte Henry und 1833 Ritchie elektromagnetische Maschinen, welche auf elektromagnetischem Wege eine Rotation zu Stande brachten.

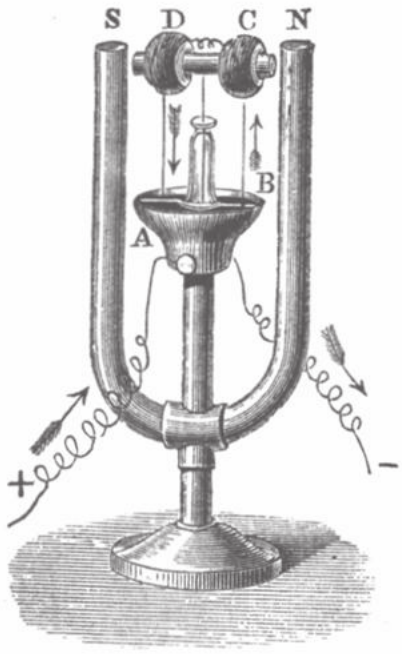


Fig. 224.

Fig. 224 zeigt eine Modifikation des Elektromotors von Ritchie. Ein Elektromagnet DC balanziert auf einer vertikalen Achse zwischen den Polen eines festen Magnets (oder Elektromagnets) SN. Ein durch eine geeignete Batterie erzeugter Strom wird durch Drähte in zwei Quecksilberschalen A und B geleitet, in welche die Enden der Spirale des beweglichen Elektromagnets CD tauchen. Geht ein Strom durch die Spirale von CD, so dreht sich der Elektromagnet derart, dass er sich in der Richtung der Verbindungslinie von N und S befindet. Bei dieser Drehung gehen jedoch die Drähte, welche in die Quecksilberschalen tauchen, von einer Schale zur gegenüberliegenden, so dass in dem Augenblicke, wo C sich S nähert, der Strom in CD umgekehrt wird und C von S abgestossen und von N angezogen wird, indem der durch CD gehende Strom bei jeder halben

Umdrehung umgekehrt wird. Bei grössern Elektromotoren werden die Quecksilberschalen durch einen Kommutator ersetzt, welcher aus einem Messingringe besteht, der in zwei oder mehrere Teile geteilt ist und an zwei gegenüberliegenden Punkten durch ein Paar Metallfedern oder »Kontakt-Bürsten« berührt wird.

Bei einer andern, von Froment erfundenen Form des Elektromotors werden Eisenstäbe, die an dem Umfange eines rotierenden Cylinders befestigt sind, von einem Elektromagnet angezogen, bei welchem der Strom auf automatische Weise unterbrochen wird, wenn alle Stäbe ganz dicht bis zu seinen Polen angezogen sind. Bei einer dritten Art zieht ein Elektromagnet ein Stück weiches Eisen abwechselnd auf und ab, in ähnlicher Weise wie sich der Kolben einer Dampfmaschine bewegt, und diese Bewegung wird dann mittelst einer Kurbelstange in eine rotierende umgesetzt. Hier tritt dann die Schwierigkeit auf, dass die anziehende Kraft eine wirksame Bewegung nur auf sehr kleine Entfernungen erzeugen kann, da die Anziehung eines Elektromagnets dem Quadrate des Abstandes von seinen Polen umgekehrt proportional ist.

Page konstruierte von 1838 bis 1850 verschiedene Motoren, bei welchen eiserne Kolben in hohle Drahtspulen gezogen wurden, durch welche er Ströme in periodischen Intervallen hindurchschickte.

Im Jahre 1839 trieb Jacobi auf der Neva ein Boot mit einer Geschwindigkeit von $2\frac{1}{4}$ Meilen pro Stunde mittelst einer elektromagnetischen Maschine von circa einer Pferdekraft, welche durch eine Batterie von 64 grossen Grove'schen Elementen getrieben wurde.

Jacobi scheint zuerst (im Jahre 1850) erkannt zu haben, dass die Wirkungsweise des elektrischen Motors einfach das Umgekehrte von der der Dynamomaschine ist. Jeder magnetoelektrische Generator oder Dynamo, wie dieselben zur elektrischen Beleuchtung verwandt werden, kann auch als Motor wirken, welcher mechanische Kraft abgiebt, wenn demselben aus irgend einer andern Quelle elektrische Ströme zugeführt

werden. In der That sind die als Generatoren bestimmten Dynamomaschinen bedeutend wirkungsvollere Motoren, als alle elektromagnetischen Maschinen älterer Art, welche wenig mehr als blosse Spielereien waren.

Im Jahre 1882 wurde auf der Themse mit einer Geschwindigkeit von 8 Meilen pro Stunde ein eisernes Schraubenboot in Bewegung gesetzt, dessen Tragfähigkeit 12 Personen war und welches von zwei solchen Motoren getrieben wurde, mit einer Stärke von circa 3 Pferdekräften; die Elektrizität wurde von 45 Akkumulatoren beschafft. Jetzt liegt auf der Themse eine ganze Flotille elektrischer Boote.

439. **Die modernen elektrischen Motoren** sind von zweierlei Art: 1) diejenigen für den Gebrauch von Gleichströmen, 2) diejenigen für den Gebrauch von Wechselströmen. Die erstern werden genau nach dem Prinzipe der Gleichstrom-Dynamomaschinen (Art. 457) konstruiert und haben feste *Feld-Magneten* und eine rotierende *Armatur*. Letztere wird zur Rotation gebracht durch die gegenseitige Wirkung der Ströme, welche in den Kupferkonduktoren fliessen, und des magnetischen Feldes, in welchem die Konduktoren sich befinden. Wie in Art. 335 auseinandergesetzt wurde, ist die Kraft, welche seitlich auf die Konduktoren wirkt, dem Produkte des Stromes und des Feldes proportional. Werden also sehr kräftige Feld-Magnete benutzt, so lässt sich ein grosses Drehungsmoment erzielen, ohne dass ein sehr starker Strom in die Armatur gesandt zu werden braucht. Die beiden Faktoren der mechanischen Rotationskraft sind das Drehungsmoment und die Winkelgeschwindigkeit. Wird das Feld des Motors konstant erhalten, so ist das Drehungsmoment dem Strome und die Geschwindigkeit den Volt proportional. Ist E die in der rotierenden Armatur erzeugte elektromotorische Kraft (in der dem Strome entgegengesetzten Richtung Art. 431) und ist C der ihr zugeführte Strom, so sind die elektrischen und mechanischen Ausdrücke für die der Armatur mitgeteilten Kraft (Watt)

$$C \,.\, E = a \,.\, n \,.\, T,$$

wo n die Umdrehungen pro Sekunde bezeichnen, T das Drehungsmoment und a eine von den gewählten Einheiten abhängige Konstante.

Wird der Strom der Armatur bei konstanten Volt zugeführt, so hat eine Verstärkung des magnetischen Feldes eine Abnahme der Geschwindigkeit zur Folge und umgekehrt. Die Beschreibung von Wechselstrommotoren findet sich in den Art. 479—481.

440. **Nutzeffekt der Elektromotoren.** Wird ein Ampèrometer in einen Stromleiter mit einer Batterie und einem Elektromotoren eingeschaltet, so ergiebt sich, dass der Strom *schwächer* ist, wenn der Elektromotor in Thätigkeit ist, als wenn derselbe in Ruhe ist, und dass der Strom der Batterie um so schwächer wird, je stärker der Elektromotor arbeitet. Dies ist die Folge der in der rotierenden Armatur des Motors erzeugten E.M.K., welche notwendigerweise dem Strome entgegengesetzt ist (Art. 431). Wenn der Motor nur eine geringe rückwärts gerichtete E.M.K. ausübt, so kann derselbe von der Kraft des Stromes nicht viel nutzbar machen. Bezeichnet V die Anzahl der Volt, mit denen der Strom zugeführt wird, E die rückwärts gerichtete, vom Motor erzeugte E.M.K. und C den Strom, so ist VC die totale zugeführte Kraft und $E.C$ die nutzbar gemachte Kraft; durch Division erhalten wir hieraus den elektrischen *Nutzeffekt* des Motors, nämlich $\frac{E}{V}$. Um einen möglichst grossen Nutzeffekt zu erzielen, muss man den Motor derart einrichten, dass E nahezu gleich V ist (entweder durch Verstärkung des magnetischen Feldes oder durch grössere Umdrehungsgeschwindigkeit). In diesem Falle macht der Motor fast die ganze ihm zugeführte Energie nutzbar. Da aber nach dem Ohm'schen Gesetze der Strom $= \frac{V-E}{r}$ ist, wo r der innere Widerstand des Motors ist, so folgt, dass in dem Falle, wo E nahezu gleich V wird, der Strom auf einen geringen Bruchteil des bei still stehendem Motor gelieferten Stromes reduziert wird. Nachstehendes Diagramm (Fig. 225) macht die

Sache anschaulich. Die Linie OV möge die zugeführten Volt darstellen und OE die in der Armatur erzeugten Volt, der Geschwindigkeit und dem Felde proportional. Ueber OV beschreibe man das Quadrat $OVWX$, ziehe die Diagonale und EH und KL. Dann ist die Fläche $EVWH$ der totalen Kraft proportional und ist $= V(V—E)$, und die Fläche $GLXH$ ist der nutzbar gemachten Kraft proportional und ist $= E(V—E)$. Wenn E annähernd gleich V ist, so sind diese beiden Flächen fast gleich, obgleich sie dann sehr klein sind. Die Fläche $GLXH$, die Netto-Kraft des Motors, ist für $E = \frac{1}{2}V$ ein Maximum; doch würde in diesem Falle der Nutzeffekt nur 50 Prozent betragen.

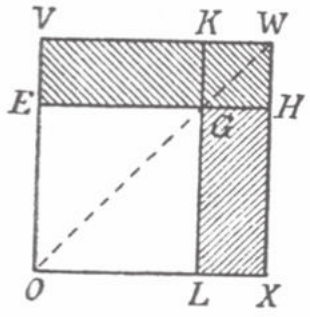


Fig. 225.

Der Umstand, dass bei kleinem E der Strom ungeheuer gross ist, ist von grossem Vorteil für das Anlaufen der Motoren; denn in diesem Augenblicke erzeugt die grosse Kraft des Stromes (welche bei längerer Dauer den Motor zerstören würde) ein grosses Drehungsmoment, so dass der Motor schnell eine grosse Geschwindigkeit annimmt und auf diese Weise den Strom auf Arbeitsstärke reduziert.

441. Elektrische Lokomotiven. Ein Motor, auf einen Eisenbahnwagen oder auf eine besondere Lokomotive gebracht, vermag dieselben zu treiben, falls die nötige Kraft zugeführt wird. Dies kann in verschiedener Weise zu stande kommen:

1) Man stellt eine Batterie oder geladene Akkumulatoren auf dem Wagen auf.

2) Der Strom wird von der Zentralstation an einer geeigneten Stelle den Schienen zugeführt, auf welchen die Wagen laufen und welche als Zu- und Rückleiter wirken. Dieselben sind isoliert. Die Wagen, welche isolierte Räder haben, beziehen ihren Strom von den Schienen.

3) Der Strom wird von der Zentralstation einer dritten von der Erde isolierten Schiene mitgeteilt. Aus dieser nimmt der Wagen den Strom auf, während die gewöhnlichen Schienen als Rückleiter dienen.

4) Der Strom wird von der Zentralstation einer oberirdischen Linie mitgeteilt, welche mit dem Wagen in leitender Verbindung steht, mittelst eines an einer langen Stange befestigten Laufrades.

Die erste Methode ist wegen des grossen Gewichts der Akkumulatoren nicht zu empfehlen. Die zweite Methode wandte Siemens im Jahre 1879 bei der ersten in Berlin erbauten elektrischen Bahn an. Die dritte Methode findet in England bei verschiedenen grössern Bahnen Anwendung, wo der Strom an Lokomotiven von 200 bis 400 Pferdekräften geliefert wird. Die vierte Methode hat man besonders in den Vereinigten Staaten benutzt, wo man heutzutage derartig eingerichtete Eisenbahnen von vielen tausend Meilen Länge findet.

442. Elektrische Kraftübertragung. Auf elektrischem Wege lässt sich die Kraft auf grosse Entfernungen übertragen, von einem Stromerzeuger an dem einen Ende eines Stromkreises nach einem Motor am andern Ende. Ein Bergstrom kann dazu benutzt werden, eine Turbine zu drehen, welche ihrerseits eine Dynamo- oder Wechselstrommaschine treibt, deren Strom mittelst isolierter Drähte einem in einem Verkehrsmittelpunkte aufgestellten Motor zugeführt wird, welcher die elektrische Kraft wieder in mechanische umwandelt. Während der Frankfurter Ausstellung im Jahre 1891 wurden 140 Pferdekräfte von den Neckarfällen bei Lauffen 117 Meilen weit durch 3 Drähte übertragen, welche nur 4 mm Durchmesser hatten, mit einem Nutzeffekt von 74 Prozent, einschliesslich aller Verluste.

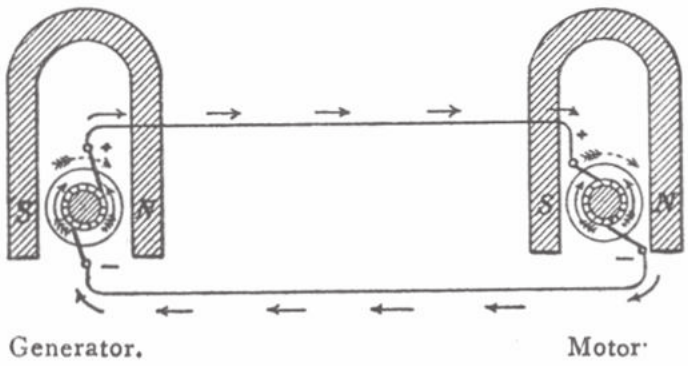


Fig. 226.

Fig 226 veranschaulicht einen einfachen Fall der Kraftübertragung zwischen zwei Maschinen. Bei der einen treibt die

E.M.K. den Strom, bei der andern wirkt sie dem Strome entgegen. Die erste wirkt als Stromerzeuger (Art. 431), die zweite als Motor. Sind ihre E.M.K. bezüglich E_1 und E_2, so ist der Nutzeffekt der Kraftübertragung $= E_2 : E_1$.

Weil innerhalb der Linie wegen ihres Widerstandes ein Teil der Kraft verloren geht und weil Kupferdrähte, welche starke Ströme führen sollen, ohne überhitzt zu werden, sehr teuer sind, so sind solche Kraftübertragungen nicht immer rentabel. Die Watt, welche in einer Linie vom Widerstande R verloren gehen, sind nach Art. 434 gleich $C^2 . R$ und die nutzbar gemachten Watt nach Art. 430 gleich $C . V_M$, wo V_M die Volt am Motor bedeuten. Folglich beträgt die Kraft, welche in die Anfangsstation der Linie einströmen muss, $C^2R + C . V_M$ Watt. Nun ist klar, dass man den Verlust C^2R konstant erhalten und dabei doch die Kraft, welche übertragen wird, dadurch vermehren kann, dass man die Grösse V_M vermehrt, indem man einen Motor mit hoher Spannung und dementsprechend auch einen Stromerzeuger mit hoher Spannung verwendet. Ist V_G die Spannung an dem Ende der Linie, wo der Stromerzeuger steht, so ist $C = R (V_G - V_M)$. Nun können wir C konstant erhalten (und daher auch C^2R) und dabei doch die Anzahl der Volt erhöhen, vorausgesetzt, dass $V_G - V_M$ sich nicht ändert.

B e i s p i e l. Angenommen, eine Kupferdrahtlinie von 20 Meilen Länge habe einen Widerstand von 100 Ohm. Ein in ihr fliessender Strom von 6 Ampère verbraucht 3600 Watt oder annähernd 5 Pferdekräfte. Um 6 Ampère durch 100 Ohm zu schicken, ist eine Potentialdifferenz von 600 Volt erforderlich. Es sei $V_G = 1000$ und $V_M = 400$, also $V_G - V_M = 600$. Die Anzahl der hineingesandten Watt ist $CV_G = 6000$ und die übertragenen Watt $C . V_M = 2400$. Von 8 verwandten Pferdekräften werden also nur ungefähr $3\frac{1}{4}$ übertragen und der Nutzeffekt ist $V_M : V_G = 40$ Prozent. Wird aber V_G auf 2000 Volt erhöht und V_M auf 1400, so ist $V_G - V_M = 600$, $C = 6$ Ampère und $C^2R = 3600$ Watt, wie vorher; dagegen betragen die benutzten Watt

jetzt 12,000 und die übertragenen Watt 8400. Demnach ist der Nutzeffekt jetzt 70 Prozent.

Es ist also klar, dass alles von der Grösse der Spannung abhängt bei der Uebertragung der elektrischen Energie auf grosse Entfernungen, sei es zu Beleuchtungszwecken oder zur Kraftabgabe. Bei der Kraftübertragung von den Fällen bei Tivoli, behufs Erleuchtung der 16 Meilen entfernten Stadt Rom, hat man eine Spannung von 5000 Volt mit Erfolg benutzt und bei dem Projekte in Betreff der Ausnutzung der Niagara-Fälle hat man eine Spannung von 30,000 Volt vorgeschlagen.

XXXIX. VORLESUNG: *Das elektrische Licht.*

443. Der Elektrische Bogen. Werden zwei Kohlenspitzen durch Drähte mit den Polenden einer kräftigen Volta'schen Batterie oder eines andern Erzeugers elektrischer Ströme verbunden, einen Moment lang zur Berührung gebracht und dann wieder bis auf einen kleinen Abstand von einander entfernt, so entsteht zwischen den Kohlenspitzen eine Art elektrische Flamme, der **Volta'sche Bogen** genannt, und ein glänzendes Licht strahlt von den Elektroden der weissglühenden Kohlenspitzen aus. Diese Erscheinung wurde zuerst im Jahre 1800 von Humphrey Davy beobachtet und kann auf folgende Weise erklärt werden: Vor der Berührung reicht die Potentialdifferenz der Kohlenspitzen nicht aus, um einen Funken durch die Luft überspringen zu lassen, selbst wenn der Abstand nur $\frac{1}{400}$ Millimeter beträgt; werden jedoch die Kohlenspitzen zur Berührung gebracht, so entsteht ein Strom. Beim Trennen der Kohlenspitzen verflüchtigt der Oeffnungsfunke einen geringen Teil der Kohle zwischen den Spitzen. Da Kohlendampf ein Halbleiter ist, so kann der Strom unausgesetzt die Lücke überspringen, falls dieselbe nicht zu gross ist; da aber der Kohlendampf einen sehr grossen Widerstand bietet, so wird derselbe durch den Durchgang des Stromes stark erwärmt, und die Kohlen-

spitzen werden ebenfalls heiss. Nun strahlen feste Körper das Licht besser aus als gasförmige, folglich geben die Kohlenspitzen weit mehr Licht von sich, als der Bogen selbst, obgleich jene nicht so heiss sind. Die Temperatur des Bogens entspricht der Temperatur, bei welcher sich Kohle verflüchtigt; nach Violle 3500° C. Innerhalb des Bogens schmelzen die am schwersten schmelzbaren Körper, wie Kiesel und Diamant; und in seiner intensiven Hitze verflüchtigen sich ohne weiteres Metalle wie Gold und Platin. Wird der Bogen im lufterfüllten Raume erzeugt, so brennen die Kohlenspitzen langsam weg auf dem Wege der Oxydation. Man hat auch beobachtet, dass Kohleteilchen von der + Elektrode abgelöst werden, welche dadurch in Form eines Kraters ausgehöhlt wird, und einige dieser Kohleteilchen werden an der — Elektrode abgesetzt, welche dadurch die in Fig. 227 veranschaulichte Gestalt annimmt. Der Widerstand des Bogens variiert je nach Umständen von 0,2 Ohm aufwärts, je nach der Länge und dem Querschnitt der Flamme. Man hat auch gefunden, dass der Bogen eine besondere entgegengesetzt gerichtete elektromotorische Kraft besitzt, bis gegen 35 Volt, wenn Gleichströme benutzt werden und der Bogen ruhig ist. Wird der Bogen unbeständig und fängt er an zu zischen, so ist die entgegengesetzt gerichtete E.M.K. viel geringer. Der Sitz dieser letztern ist die Oberfläche des Kraters, wo das Verflüchtigen der Kohle vor sich geht.

Um ein befriedigendes elektrisches Licht zu erzeugen, ist mindestens eine elektromotorische Kraft von 40 bis 50 Volt erforderlich, falls Gleichstrom benutzt wird. Bei Wechselströmen genügen 30 bis 35 Volt. Der gebräuchliche Strom für Bogenlampen in der Stärke von 1000 bis 2000 Kerzen beträgt 5 bis 10 Ampère. Mit schwächern Strömen oder geringerer E.M.K. einen beständigen Bogen zu unterhalten, ist unthunlich. Für Schiffslampen oder für Leuchttürme benutzt man Bögen von grösserer Stärke, indem man dickere Kohlestäbe verwendet und ihnen Ströme von 20 bis 100 Ampère zuführt oder noch mehr. Die gewöhnliche Grösse der verwendeten Kohlestäbe

beträgt 10 bis 11 mm Durchmesser; der Verbrauch beträgt annähernd $2\frac{1}{2}$ cm pro Stunde, wobei der + Pol viel schneller abgenutzt wird als der negative. Der innere Widerstand der gewöhnlichen Daniell'schen oder Leclanché'schen Elemente (wie solche in der Telegraphie benutzt werden) ist zu gross, als dass sie zur Erzeugung des elektrischen Lichts benutzt werden könnten. Eine Batterie von 40 bis 60 Grove'schen Elementen

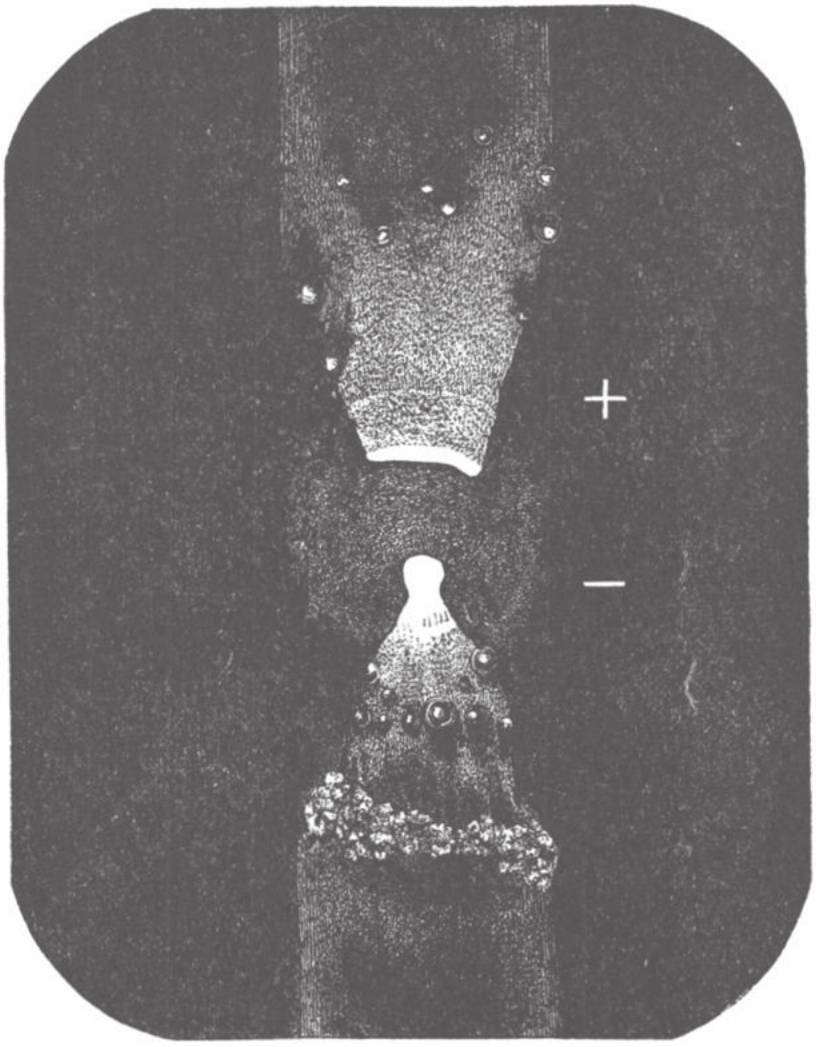


Fig. 227.

(Art. 177) genügt, dauert jedoch nicht länger als 2 bis 3 Stunden. Eine dynamo-elektrische Maschine (wie eine solche in den Art. 456 und ff. beschrieben werden wird), welche durch eine Dampfmaschine in Bewegung gesetzt wird, ist der beste Stromerzeuger für praktische elektrische Beleuchtung.

Die Lichtmenge, welche von einer elektrischen Lampe aus-

gestrahlt wird, ist nicht in allen Richtungen dieselbe. Ist die + Kohle oben, so wird die grösste Lichtmenge unter einem Winkel von 45° (nach unten) ausgestrahlt. Das meiste Licht kommt von dem weissglühenden Krater, sehr wenig vom — Pole. Beim Wechselstrom-Bogen sind die Kohlenspitzen gleich und senden gleich viel Licht aus. Der Strom muss in der Sekunde wenigstens in 40 Perioden wechseln. Die gesamte ausgesandte Lichtmenge ist dem Strome, falls derselbe bei konstanten Volt zugeführt wird, nicht genau proportional, sondern nimmt in etwas stärkerem Verhältnis zu. Durch Verdopplung des Stromes erhält man etwas mehr als die doppelte Lichtmenge.

444. **Bogenlichtlampen.** Davy verwendete Holzkohle zu Elektroden, um das Bogenlicht zu erhalten. Später wurden von Foucault harte Gaskohlenstifte eingeführt. In allen neuern Bogenlichtlampen kommen Stifte einer dichtern und mehr homogenen, künstlichen Koakskohle zur Verwendung. Dieselben nutzen sich regelmässiger und langsamer ab; doch ist noch eine Vorrichtung nötig, um die Kohlenspitzen mit der erforderlichen Geschwindigkeit gegen einander zu bewegen. Der Bogen muss durch den Mechanismus erregt werden, indem er die Stifte zur Berührung bringt und dann sie wieder bis auf die gehörige Entfernung trennt, um einen beständigen Bogen zu erzeugen; durch den Mechanismus muss auch dafür gesorgt werden, dass die Kohlenspitzen in dem Bogen in eben dem Maße wieder einander näher gerückt werden, wie sie verbraucht werden, und dass dieselben in automatischer Weise einander näher gerückt oder von einander entfernt werden, falls der Bogen zu klein oder zu gross wird. Auch muss der Mechanismus die Kohlenspitzen einen Moment lang zur Berührung gelangen lassen, um den Bogen von neuem zu erregen, falls derselbe zufällig ausgegangen sein sollte. *Bogenlichtlampen oder Regulatoren,* welche diese Bedingungen erfüllen, sind von verschiedenen Seiten konstruiert worden. Dieselben können folgendermaßen klassifiziert werden:

a) *Lampen mit Uhrwerk.* Fig 228 zeigt den Regulator Foucault's, wie derselbe von Duboscq konstruiert wird; bei

dieser Lampe werden die Träger der Kohlenstifte durch ein Uhrräderwerk bewegt, welches durch eine Feder getrieben wird. Am untern Teile zieht ein Elektromagnet, durch welchen der Strom fliesst, eine Armatur an und regelt das Uhrwerk. Ist der Strom zu stark, so wird die Armatur heruntergezogen und das Uhrwerk zieht die Kohlenstifte weiter auseinander. Wird der Strom durch den Widerstand des Bogens geschwächt, so wird die Armatur durch eine Feder aufwärts getrieben und ein zweites Räderwerk tritt in Wirkung und bewegt die Kohlenstifte näher aneinander. Lampen mit Uhrwerk sind auch von Serrin und Crompton konstruiert worden, bei denen der Mechanismus des Uhrwerks durch das Gewicht der Kohlenstifte getrieben wird.

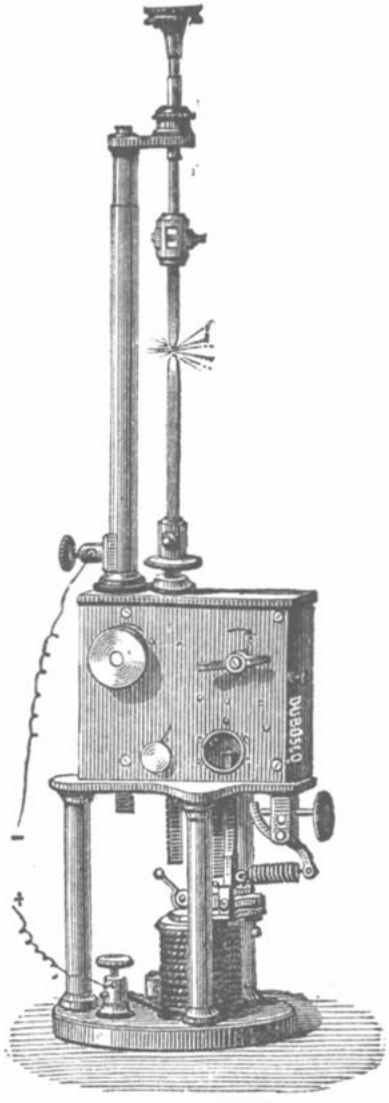


Fig. 228.

b) *Lampen mit Bremsrad.* Jaspar und Crompton haben einen Mechanismus erfunden, welcher die Art und Weise, in der die Kohlen einander genähert werden, regelt und bei dem zu dem Räderwerke noch ein Bremsrad hinzutritt; die Bremse, welche das Rad hemmt, wird durch einen kleinen Elektromagnet getrieben, welcher das Rad etwas weiter rollen lässt, wenn der Widerstand des Bogens über seinen normalen Betrag zunimmt. In Fig. 229 ist *B* das Bremsrad, *L* der dasselbe regulierende Hebel, *C* ein Eisenkern der in den Stromkreis geschalteten Spule *S*. Wird der Strom hineingeschickt, so wird der Eisenkern aufwärts gezogen, wodurch *L* das Rad *B* etwas dreht, so dass die Kohlenstifte auseinander gehen und der Bogen erregt wird.

c) *Solenoid-Lampen.* Bei dieser Art von Bogenlichtlampen

ist das eine Kohlenstück an einem eisernen Stabe befestigt, der sich innerhalb einer hohlen Spirale (Solenoid) vertikal auf und ab bewegen kann. Da diese vom Strom durchflossen wird, so reguliert sie die Stellung der Kohlenspitzen und die Länge des Bogens. Siemens verwendete zwei Solenoide, welche differentiell gegen einander wirkten, indem das eine in den Hauptstrom, das andere in einen Nebenschluss des Stromes geschaltet war. Letzteres wirkt als Voltmeter, um den Bogen zu überwachen und die Kohlenstifte vorwärts zu treiben, wenn die Volt zu gross werden.

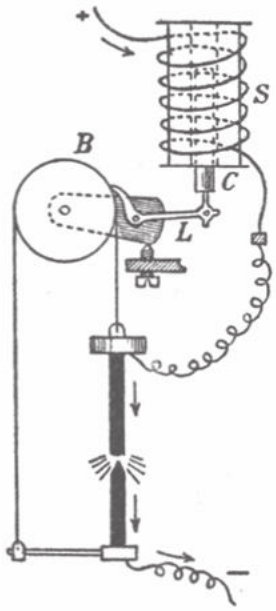


Fig. 229.

d) *Lampen mit Klammern.* Eine etwas einfachere Vorrichtung ist der Gebrauch einer Klammer, welche das obere Kohlenstück in die Höhe zieht, während das untere fest bleibt. Bei dieser Art von Lampen wird die Klammer durch einen Elektromagnet in Bewegung versetzt, durch welchen der Strom hindurchgeht. Geht die Lampe aus, so lässt der Magnet die Klammer los und das obere Kohlenstück fällt durch sein eigenes Gewicht herab, und berührt das untere Kohlenstück. Sofort fliesst der Strom um den Elektromagnet, wodurch letzterer auf die Klammer wirkt, welche das Kohlenstück ergreift und dasselbe wieder bis zu dem erforderlichen Abstande in die Höhe hebt. Sollte der Bogen zu lang werden, so gestattet die verminderte Anziehung der Klammer dem Kohlenstück, etwas fortzurücken.

e) *Motor-Lampen.* Bisweilen werden kleine elektrische Motoren verwandt, um den Gang der Kohlenstücke automatisch zu regeln.

445. Gruppierung der Bogenlampen. Wird der Strom bei konstanten Volt zugeführt, so müssen die Bogenlampen *parallel* geschaltet werden. Sollen dieselben in *Serien* aufgestellt werden, wobei derselbe Strom nach und nach durch jede Lampe fliesst, so ist ein Strom von konstanter Stärke erforder-

lich. Auch muss in diesem Falle jede Lampe einen Nebenschluss haben.

446. Elektrische Kerzen. Um die Kosten und den komplizierten Mechanismus solcher Regulatoren zu vermeiden, haben Jablochkoff, Wilde und andere elektrische *Kerzen* erfunden. Fig. 230 stellt die *Jablochkoff'sche Kerze* dar, welche aus zwei parallelen harten Kohlenstiften besteht, die durch eine dünne Schicht von Wolfswurzpflaster getrennt sind und von einer vertikalen Stütze getragen werden. Der Bogen bildet sich oben an der Spitze zwischen den beiden Kohlendochten. Damit beide Kohlenstücke gleichmässig verbraucht werden, müssen alternierende Ströme in Anwendung kommen.

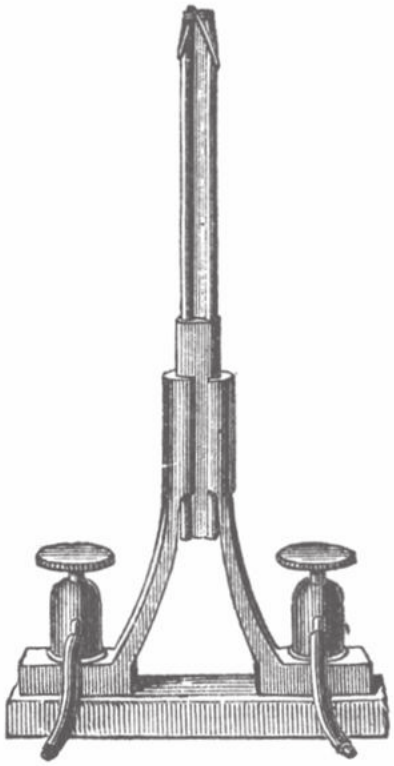


Fig. 230.

447. Elektrische Glühlampen. Volta'sche Bögen, deren Leuchtkraft weniger als 100 Kerzen beträgt, können praktisch nicht beständig unterhalten werden und sind auch unvorteilhaft. Für kleinere Beleuchtungen ist es einfacher und billiger, einen dünnen kontinuierlichen Draht oder einen Faden eines unschmelzbaren Leiters zu benutzen, welcher beim Stromdurchgang bis zur Weissglühhitze erwärmt wird. Dünne Platindrähte sind zu diesem Zwecke häufig in Vorschlag gekommen, doch ist bei ihnen Gefahr des Schmelzens vorhanden. Iridiumdrähte und dünne Kohlenstreifen sind ebenfalls von einigen Erfindern vorgeschlagen. Im Jahre 1878 erfand Edison eine Lampe, welche aus einer Platinspirale bestand, die mit einem Nebenschluss verbunden war, damit der Strom von der Lampe abgelenkt werden könnte, falls dieselbe überhitzt würde. Swan zeigte im Februar 1879 eine Lampe mit Kohlefaden in einer luftleeren Kugel. Edison erfand im Oktober 1879 eine Vakuum-Lampe mit einem spiralförmig gewundenen Faden, der aus

Lampenruss und verkohltem Teer besteht. Swan verfertigte im Januar 1880 Fäden aus in Schwefelsäure getränkter Baumwolle, welche er dann verkohlen liess. Edison ersetzte im Jahre 1880 den Kohlefaden durch einen schmalen Streifen aus verkohltem Bambusrohr. Lane Fox benutzte im Jahre 1879 verkohlte Pflanzenfasern. Crookes verwendete einen aus Seide oder Pflanzenstoff präparierten Faden, der mit Kupferammoniak-Chlorür behandelt war.

Die modernen Glühlampen haben gewöhnlich dünne Kohlendrähte, die aus Cellulose hergestellt und dann in einem geschlossenen Gefässe verkohlt werden. Sie werden mit Platindrähten eingefasst, welche in eine Glaskugel führen, wo sie festgesiegelt werden; dann werden aus den Glaskugeln die Luft und andere Gase möglichst vollkommen durch Gebrauch von besondern Quecksilberluftpumpen entfernt. Kohle eignet sich zu diesem Zwecke besser als Platin oder andere Metalle, teils wegen ihrer schwierigen Schmelzbarkeit und ihres grössern Widerstandes, teils wegen ihrer bemerkenswerten Eigenschaft, bei hohen Temperaturen einen geringern Widerstand zu bieten, als bei niedrigen Temperaturen. Zwei gebräuchliche Formen von Glühlampen zeigt Fig. 231; die Swan'sche, in England gebräuchliche und die von Edison vervollkommnete, in Amerika verwendete Form. Der Widerstand solcher Lampen variiert je nach Grösse und Länge des Fadens. Eine moderne Lampe von 16 Kerzen Lichtstärke beansprucht bei Anwendung eines Stromkreises von 100 Volt ungefähr 0,6 Ampère, d. h. ihr Widerstand beträgt ungefähr 166 Ohm, wenn sie erhitzt ist, (oder mehr als 200 Ohm, wenn sie kalt ist), und sie absorbiert circa 60 Watt. Das entspricht einem Verhältnisse von weniger als 4 Watt pro Kerze. Unter diesen Umständen hält sie durchschnittlich mehr als 1000 Brennstunden vor. Benutzt man einen dünnern und etwas kürzern Faden, so geben die Lampen das-

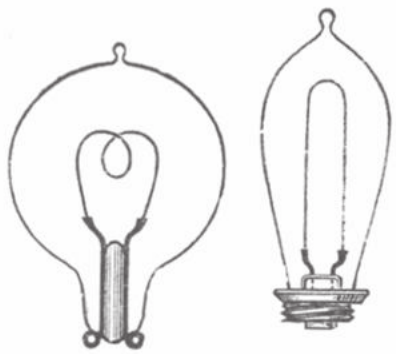


Fig. 231.

selbe Licht und gebrauchen weniger Strom; doch ist dann ihre Dauer nicht so lange. Die Oberfläche verwittert mit der Zeit, falls die Lampe zu viel Licht aussenden soll. Die Kraft, welche erforderlich ist, um 12 solche 60-Watt-Lampen zu unterhalten, beträgt 720 Watt oder circa eine Pferdekraft.

Die folgende Tabelle enthält einige Angaben über eine 50-Volt-Lampe von 10 Kerzen bei verschiedener Spannung:

Volt.	Ampère.	Watt.	Lichtstärke.	Watt pro Kerze.	Wahrscheinliche Dauer (in Stunden).
48	0,77	37	8	4,3	3200
50	0,81	40,5	10	4,05	1500
53	0,87	46,4	14,5	3,2	800
55	0,92	50,6	18,5	2,7	480
58	0,99	57,5	25,5	2,2	250
61	1,06	64,7	35,5	1,8	150

Das Licht ist ungefähr der 6ten Potenz der Volt proportional, die verbrauchte Energie der zweiten Potenz. Doch nimmt die Lebensdauer einer Lampe sehr schnell ab, wenn man die Volt nur sehr wenig erhöht.

Für besondere Lampen von grosser Lichtstärke, von 800 bis 1000 Kerzen, können dünne Fäden nicht gebraucht werden. Man verwendet in diesem Falle flache Streifen oder dicke Drähte von Kohle; bei gleichem Kraftaufwand geben sie viel weniger Licht als eine Bogenlampe.

448. Gruppierung der Glühlampen. Glühlampen werden gewöhnlich *parallel* geschaltet (Fig. 232), zwischen Hauptleitern, welche auf konstanten Volt erhalten werden. Der gebräuchliche Betrag der Potentialdifferenz zwischen dem + und — Hauptstrange beträgt 100 Volt. Der in den Hauptsträngen zirkulierende Strom teilt sich und fliesst durch jede Lampe selbständig. Wenn eine

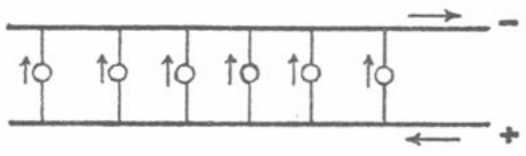


Fig. 232.

Lampe eingeschaltet wird, so wird dadurch der Strom in den andern nicht verringert, denn das Einschalten einer neuen Bahn hat nur zur Folge, dass die Elektrizitätsquelle einen entsprechend stärkern Strom abgiebt. Die Methode der Gruppierung in *Serien* (Art. 163) findet bei Glühlampen selten Anwendung; jede Lampe erfordert alsdann einen automatischen Ausschalter, damit nicht etwa, falls eine Lampe erlischt, auch die übrigen Lampen der Reihe ausgehen.

Das *Drei-Draht*-System, bei dem ein dritter oder neutraler Draht zwischen dem + und — Hauptstrange liegt, hat den Zweck, eine grössere Anzahl von Volt benutzen und auf diese Weise die doppelte Anzahl von Lampen mit einem geringen Mehraufwand von Kupfer anzünden zu können. Um die Lampen auf der einen Seite des Stromkreises (Fig. 233) von denen auf der andern Seite unabhängig zu machen, falls nicht zufällig dieselbe Anzahl gleichzeitig eingeschaltet wird, wird der mittlere Draht, welcher nur so dick zu sein braucht, dass er einen Strom gleich der Differenz der Ströme in den beiden äussern Drähten führt, nach der Station zurückgeleitet und auf einem mittleren Potential zwischen den beiden äussern Drähten erhalten, indem man nicht eine, sondern zwei Dynamomaschinen verwendet.

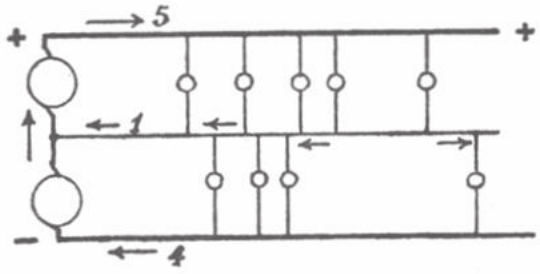


Fig. 233.

KAPITEL IX.

SELBSTINDUKTION.

XL. VORLESUNG: *Gegenseitige Induktion.*

449. Die gegenseitige Induktion zweier Stromkreise, eines primären und eines sekundären, haben wir bereits im Art. 219 kurz besprochen. Wir wollen jetzt die auf diese Weise induzierten elektromotorischen Kräfte betrachten. Angenommen, die primäre Spule habe S_1 und die sekundäre S_2 Windungen. Zunächst mögen dieselben so angeordnet sein (durch Benutzung eines Eisenkerns oder durch geometrische Nebeneinanderstellung), dass alle magnetischen Linien, welche in der primären Rolle hervorgerufen werden, durch sämtliche Windungen der sekundären Spule hindurchgehen; hierbei werden beide Spulen dicht neben einander auf einem passenden, aus dünnen Platten bestehenden Eisenkerne aufgestellt.

Nach Art. 372 ist die magnetische Flut, welche von dem Strome C in der primären Spule herrührt,

$$N = \frac{4\pi C \cdot S_1}{10 Z},$$

wo Z der Widerstand des magnetischen Stromkreises ist (Art. 371). Wird der Strom C geschlossen oder geöffnet, so werden von den S_2 Windungen der sekundären Spule im ganzen:

$$S_2 N = \frac{4\pi C \cdot S_1 S_2}{10 Z}$$

magnetische Linien geschnitten. Daraus folgt, dass die An-

zahl der geschnittenen magnetischen Linien (d. h. die Induktion im sekundären Stromkreise), welche von 10 Ampère herrühren (= 1 . CGS Stromeinheit), den Wert $\frac{4\pi S_1 S_2}{Z}$ hat. Diese Grösse wird der Kürze wegen mit dem Buchstaben M bezeichnet. Sind primäre und sekundäre Spule nicht derart aufgestellt, dass *alle* magnetischen Linien, welche von der einen herrühren, durch die Windungen der andern hindurchgehen, so hat M einen geringern Wert.

Die praktische Einheit für Koeffizienten gegenseitiger Induktion ist dieselbe wie für diejenigen der Selbstinduktion, nämlich das *Henry* (Art. 349) und beträgt 10^9 CGS Einheiten. Um daher M auf Henry zu reduzieren, müssen wir den obigen Wert durch 10^9 dividieren.

Wenn der Strom in der primären Spule sich im Verhältnis $\frac{dC}{dt}$ ändert, so ist die dadurch im sekundären Stromkreise induzierte elektromotorische Kraft

$$E = - M . \frac{dC}{dt},$$

wo E in Volt ausgedrückt wird, falls M Henry, C Ampère und t Sekunden bedeuten.

Der Wert der Grösse M für die kleinen beim Telephonieren benutzten Induktionsrollen beträgt gewöhnlich 0,01 Henry; für einen Ruhmkorff von 10 cm Funkenlänge beträgt M gegen 5 Henry.

Beispiel. Angenommen, M hätte bei einem Funkeninduktor den Wert von 8 Henry und der primäre Strom ändere sich um 1 Ampère in $\frac{1}{10000}$ Sekunde (infolge des schnell wirkenden Unterbrechers), so beträgt die E.M.K., welche während jener kurzen Zeit in dem sekundären Stromleiter induziert wird, 80,000 Volt.

Zur Messung eines Koeffizienten der gegenseitigen Induktion hat man verschiedene Methoden, von denen einige auf dem Gebrauche der Wheatstone'schen Brücke basieren. Die beste Methode verdanken wir jedoch Carey Foster. Der elektrischen

Menge, welche von einem Kondensator von bekannter Kapazität K entladen wird, der durch einen Widerstand p in den primären Stromkreis nebengeschaltet ist, wird das Gleichgewicht gehalten durch diejenige Menge, welche in dem sekundären Stromkreise entladen wird, indem man einen Widerstand q in dem letztern reguliert. Dann ist $M = K \cdot pq$.

450. Induktionsströme höherer Ordnung. Joseph Henry, welcher unabhängig von andern die magnetoelektrische Induktion entdeckte, machte auch die weitere Entdeckung, dass die Veränderungen in der Stärke des sekundären Stromes in einem dritten geschlossenen Stromkreise tertiäre Ströme und dass Veränderungen in der Stärke der tertiären Ströme solche vierter Ordnung induzieren können u. s. w. Ein einziger plötzlich geschlossener primärer Strom erzeugt daher zwei sekundäre Ströme (einen entgegengesetzt und einen gleich gerichteten); jeder von diesen erzeugt zwei tertiäre, beide zusammen also 4 tertiäre Ströme. Wenn jedoch die Stärke des primären Stromes periodisch steigt und fällt, so ist die Anzahl der sekundären und tertiären Ströme gleich der der primären; allein die Ströme der zweiten, vierten u. s. w. Ordnung haben die entgegengesetzte Richtung wie die der ersten, dritten, fünften u. s. w. Ordnung.

451. Gesetz von Lenz. Im Art. 218 wurde auseinandergesetzt, wie eine Zunahme der durch einen Stromleiter führenden magnetischen Kraftlinien (z. B. beim Einführen eines Magnets) bestrebt ist, einen engegengesetzt gerichteten Strom ins Leben zu rufen, d. h. einen solchen, welcher in einer dem Magnetismus entgegengesetzten Richtung fliesst. In ähnlicher Weise hat eine Abnahme der magnetischen Linien (z. B. beim Herausziehen des Magnets) zur Folge, dass Ströme ins Leben gerufen werden, welche den Magnet zurückzuziehen streben. Ferner wurde im Art. 374 festgestellt, dass auf einen von einem Strom durchflossenen Konduktor eine Kraft ausgeübt wird, welche denselben so zu stellen strebt, dass er möglichst viele magnetische Kraftlinien einschliesst. Wird jedoch die Anzahl der Kraftlinien vermehrt, so tritt während der Zunahme eine entgegen-

gesetzt gerichtete (oder negative) E.M.K. auf, welche den ursprünglichen Strom und damit auch die Bewegung zu hemmen strebt. Ist im Anfange kein Strom vorhanden, so erzeugt die Bewegung einen solchen, welcher, da er in negativer Richtung fliesst, die Zahl der durch den Stromleiter führenden Kraftlinien zu vermindern und auf diese Weise die Bewegung zu hemmen sucht. Lenz fasste im Jahre 1834 alles dahin zusammen, dass er sagte: *In allen Fällen einer elektromagnetischen Induktion haben die induzierten Ströme eine solche Richtung, dass ihre Gegenwirkung die sie erzeugende Bewegung zu hemmen strebt.* Dies ist bekannt unter dem Namen des Gesetzes von Lenz; dasselbe ist ein besonderer Fall des auf alle elektromagnetischen Systeme anwendbaren allgemeinen Gesetzes: *Jede auf ein solches System ausgeübte Wirkung, welche eine Aenderung in seiner Gestalt oder Lage hervorbringt und somit eine Umwandlung von Energie bedingt, erzeugt Gegenwirkungen, welche die Gestalt und Lage jenes Systems unverändert zu erhalten streben.* (Vergl. Art. 199 und 374.)

452. Wirbelströme, welche in Metallplatten induziert werden. Im Jahre 1824 machte Gambey die Entdeckung, dass eine in ihrem Gehäuse schwingende Kompassnadel schneller zur Ruhe kam, wenn der Boden des Gehäuses aus Metall statt aus Holz besteht. Arago untersuchte diese Erscheinung und fand, dass eine unter der Nadel befindliche Kupferplatte die Schwingungen jener sehr wirksam zu dämpfen vermochte. Er liess dann eine Kupferplatte in ihrer eigenen Ebene unterhalb einer Magnetnadel rotieren und beobachtete, dass die Nadel wie durch eine unsichtbare Reibung herum gezogen wurde. Wurde eine Kupferscheibe oberhalb eines rotierenden Magnets aufgehängt, so ergab sich, dass erstere durch letztere mitgezogen wurde. Man versuchte, diese Erscheinungen (*Arago's Rotationen*) dadurch zu erklären, dass man eine Art Rotationsmagnetismus annahm; Faraday bewies jedoch, dass sie eine Folge der Induktion sind. Ein Magnet, welcher in der Nähe einer soliden Metallplatte bewegt wird, induziert in derselben Ströme, welche, indem sie von einer Stelle zur andern fliessen, ihre Energie

eventuell in Wärme umsetzen, und welche während ihres Bestehens elektromagnetische Kräfte erzeugen, die in Uebereinstimmung mit dem Gesetze von Lenz die Bewegung zu hemmen suchen. Diese Ströme, welche ganz innerhalb des Metalls zirkulieren, heissen **Wirbelströme.** Lässt man einen Würfel oder eine Kugel aus gut leitendem Metall zwischen den Polen eines starken Elektromagnets (Art. 364) rotieren und schickt dann den Strom plötzlich durch, so bleibt das rotierende Metall sofort stehen. In einer Kupferscheibe, welche zwischen den Polen eines Magnets rotiert (Fig. 234) hat man ein Paar Wirbelströme in demjenigen Teile, welcher zwischen den Polen hindurchgeht, und diese Ströme suchen die Scheibe rückwärts zu bewegen. In der That erleidet jeder Konduktor, welcher gewaltsam durch die Linien eines magnetischen Feldes getrieben wird, einen mechanischen Widerstand, der von den induzierten Strömen herrührt, welche seiner Bewegung entgegen sind. Foucault wies nach [1]), dass eine Scheibe, welche zwischen den Polen eines kräftigen Elektromagnets in Rotation erhalten wird, sich infolge der in ihr induzierten Wirbelströme erwärmt.

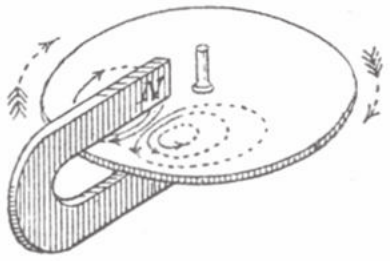


Fig. 234.

Die Hemmung, welche ein Wirbelstrom auf einen beweglichen Konduktor ausübt (bisweilen magnetische Reibung genannt) ist eine Kraft, welche der Geschwindigkeit sowie dem Quadrate des magnetischen Feldes proportional ist; denn die Kraft (Art. 335) ist dem Produkte des Feldes und des Stromes proportional, und der Strom, (welcher längs einer gegebenen Bahn zirkuliert), ist sowohl dem Felde als auch der Geschwindigkeit proportional. Daher wird die Hemmung des Wirbelstromes bei einigen Arten der elektrischen Zufuhrmaße (Art. 437) dazu benutzt, die Geschwindigkeit des beweglichen Teiles zu kontrollieren.

---

1) Daher nennen einige Schriftsteller diese Ströme auch Foucault-Ströme, obgleich sie schon viele Jahre vor den Versuchen Foucault's bekannt waren.

Elektrische Wechselströme rufen ebenfalls Wirbelströme in benachbarten Metallplatten hervor; aus diesem Grunde müssen die Eisenkerne der Transformatoren (Art. 475) und der Dynamo-Armaturen (Art. 458) aus dünnen Platten bestehen, denn sonst würde eine Erwärmung und damit eine Vergeudung der Energie eintreten.

Ferner ist zu beachten, dass Wirbelströme in einer Metallplatte zwischen einem primären und einem sekundären Stromleiter bestrebt sind, im letztern tertiäre elektromotorische Kräfte ins Leben zu rufen, welche den vom primären Strome erzeugten entgegengesetzt sind. Daher wirken dazwischen gestellte Metallplatten als *Induktions-Schirme.*

XLI. VORLESUNG: *Selbstinduktion.*

453. Selbstinduktion. Im Art. 219 haben wir gezeigt, dass die Zu- oder Abnahme eines Stromes auf einen benachbarten Stromleiter eine induktive Wirkung ausübt, welche von der Aenderung des magnetischen Feldes herrührt, das den veränderlichen Strom umgiebt. Da jedoch die magnetischen Linien, welche einen Strom umgeben, bei ihrem Verlaufe nach innen und aussen andere Teile *desselben* Stromleiters durchschneiden, so ist klar, dass ein Strom induktiv auf sich selbst wirken kann. Diese Selbstinduktion ist gross, wenn der Stromleiter aus einer Rolle mit vielen Windungen besteht, und wird durch einen in der Rolle befindlichen Eisenkern noch verstärkt. Angenommen, die Rolle hätte S Windungen und es würde eine magnetische Flut von N Linien durch dieselben erzeugt, falls ein Strom C hindurchgeschickt wird. Es ist klar, dass das Durchschicken des Stromes dieselbe Wirkung hat, als wenn ein Magnet von N Linien plötzlich in die Rolle geschoben würde; und das Verschwinden des Stromes hat dieselbe Wirkung, als wenn der Magnet plötzlich weggezogen würde. Nun ist nach Art. 220 der Strom, welcher durch das Einschieben eines Magnets induziert wird, ein entgegengesetzt gerichteter, welcher den Magnet zu verdrängen strebt, während der beim Wegziehen des Magnets induzierte Strom ein gleichgerichteter ist, welcher ihn festzuhalten strebt.

Daraus folgt, dass die selbstinduzierte E.M.K. beim Durchschicken des Stromes diesem entgegengesetzt ist, und verhindert, dass derselbe so schnell anwächst, wie er es sonst thun würde, während die beim Unterbrechen des Stromes induzierte E.M.K. bestrebt ist, den Strom noch weiter fliessen zu lassen. In beiden Fällen wirkt die Selbstinduktion einem Wechsel entgegen: sie wirkt als *elektromagnetische Trägheit.*

In dem oben angenommenen Falle, wo die Rolle S Windungen hat, werden im Ganzen $S \,.\, N$ magnetische Linien durchschnitten, vorausgesetzt, dass alle Linien auch sämtliche Spiralen durchdringen. Mit dem Buchstaben L wollen wir die Summe der vom Stromkreise durchschnittenen Linien bezeichnen, falls ein Strom von 1 Ampère plötzlich hindurchgeschickt oder plötzlich unterbrochen wird. Es ist dann offenbar $L \,.\, C = S \,.\, N$. Die Grösse L heisst der *Koeffizient der Selbstinduktion* des Stromkreises. Die Einheit der Induktion heisst das **Henry** und entspricht dem Falle, wo 10^8 magnetische Linien durchschnitten werden, falls ein Strom von 1 Ampère hindurchgeschickt oder unterbrochen wird.

Da bei Stromkreisen ohne Eisenkern N der Grösse S proportional ist, so ist L proportional zu S^2. Oder nach Art. 372 $N = \frac{4\pi \, C \,.\, S}{10 \, Z}$ und da die Gesamtzahl der von den S Spiralen durchschnittenen Linien $S \,.\, N$ ist (falls alle Linien durch sämtliche Spiralen gehen), so folgt, dass die Induktion für 10 Ampère

$$L = \frac{4\pi \,.\, S^2}{Z},$$

welcher Ausdruck sich durch Division durch 10^9 auf Henry zurückführen lässt. Gehen nicht alle Linien durch sämtliche Spiralen hindurch, so ist der Wert von L ein geringerer.

Die selbstinduzierte E.M.K. hängt von dem Verhältnis ab, in welchem der Strom sich ändert; denn findet das Durchschneiden $S \,.\, L$ in der Zeit t statt, so folgt nach Art. 220:

$$E = - \frac{S \,.\, N}{t} = - \frac{L \,.\, C}{t}.$$

Da sich aber der Strom nicht gleichmässig ändert, so ist auch E nicht gleichmässig. Aendert sich der Strom in der unendlichen kleinen Zeit dt um dC, so haben wir das Verhältnis $\frac{dC}{dt}$ und die selbstinduzierte E.M.K. ist $= -L \cdot \frac{dC}{dt}$.

Die formale Definition des Henry (Art. 349) basiert auf dem obigen Ausdrucke, um sowohl auf Stromkreise mit Eisenkern als auch auf solche ohne Eisenkern angewandt werden zu können.

Die Energie des den Strom umgebenden magnetischen Feldes ist $\frac{1}{2} L \cdot C^2$, denn wächst das Feld auf $L \cdot C$ Linien an, so ist der Durchschnittswert des Stromes $\frac{1}{2} C$.

Um den Koeffizienten der Selbstinduktion zu bestimmen, hat man verschiedene Methoden:

a) *Wechselstrom-Methode.* Die Zahl der Volt V, welche erforderlich sind, um den Strom C durch n Windungen einer Rolle mit dem Widerstande R und dem Koeffizienten L zu schicken, beträgt: $V = C\sqrt{R^2 + 4\pi^2 n^2 L^2}$, oder, falls der Widerstand vernachlässigt werden kann, $V = 2\pi n C L$, folglich $L = V : 2\pi n C$ (vergl. Art. 467).

b) *Brücken-Methoden.* Die beste ist die Maxwell'sche. Das Gleichgewicht möge auf gewöhnlichem Wege hergestellt sein, indem der Schlüssel erst in den Batteriestromkreis und dann in den des Galvanometers niedergedrückt wird (Art. 410). Darauf drücke man die Schlüssel in umgekehrter Folge nieder, wo das Vorhandensein der Selbstinduktion in einem der 4 Arme Gleichgewicht herstellt, indem die Nadel einen Ausschlag α angiebt, welcher der Selbstinduktion proportional ist. Dann füge man demselben Arme einen kleinen Widerstand r hinzu, derart, dass eine kleine dauernde Ablenkung δ vorhanden ist, wenn die Schlüssel wieder in der gewöhnlichen Reihenfolge benutzt werden. Ist die periodische Schwingungszeit der Nadel gleich T, so hat man folgende Formel: $L = \frac{Tr\alpha}{2\delta\pi}$.

c) *Secohmmeter-Methode.* Ayrton und Perry erfanden einen Apparat, welcher den Batteriestromkreis der Brücke abwechselnd herstellt und unterbricht, und welcher nur das Galvanometer während eines kurzen Zeitintervalles T in Thätigkeit setzt, unmittelbar nach jedesmaligem Herstellen des Batteriestromkreises. Da der Strom während dieses Intervalles an Stärke zunimmt, so wirkt die Selbstinduktion L einer Rolle, welche sich an einem der Arme der Brücke befindet, gerade so, als ob jener Arm einen besondern Widerstand r mehr besässe. Wir haben dann die Formel: $L = T \,.\, r$. Da demnach L gleich dem Produkte aus Sekunden und Ohm ist, schlugen Ayrton und Perry vor, die jetzt Henry genannte Einheit ein *Secohm* zu nennen.

454. Wirkungen der Selbstinduktion. Die Selbstinduktion innerhalb eines Stromkreises beeinflusst die Ströme in verschiedener Weise. Die besondere *hemmende Wirkung* auf Wechselströme wird im Art. 469 erwähnt werden. Die Wirkungen auf Batterieströme sind ebenfalls von Bedeutung. So lange die Stromstärke unverändert bleibt, hat die Selbstinduktion überhaupt keinen Einfluss; aber wenn der Strom zu fliessen beginnt oder aufhört, wird derselbe von der Selbstinduktion wesentlich beeinflusst. In jedem Falle ist die Selbstinduktion bestrebt, einem Wechsel in der Stromstärke entgegen zu arbeiten, wie nach dem Gesetze von Lenz (Art. 451) vorauszusehen ist. Nimmt die Stromstärke zu, so hat die Selbstinduktion zur Folge, dass die Zunahme verlangsamt wird. Ist ein Strom im Aufhören begriffen, so ist die Selbstinduktion bestrebt, den Strom zu verlängern.

Das Vorhandensein der Selbstinduktion in einem Stromleiter wird durch den sg. **Extrastrom** dokumentiert, welcher in dem Augenblicke der Stromunterbrechung als heller Funken hervortritt. Ist der Stromleiter ein gerader Draht und ein dazu paralleler rückführender Draht, so hat man wenig oder gar keine Selbstinduktion. Ist jedoch der Stromleiter eine Rolle, so hat man, besonders wenn die Rolle einen Eisenkern hat (wie beim Elektromagnet) einen glänzenden Funken beim Stromunterbrechen und derjenige, welcher die beiden Enden der

Drähte hält, zwischen welchen der Strom unterbrochen wird, emfpängt einen Schlag, infolge der hohen E.M.K. dieses selbstinduzierten Extrastromes. Dieser Funken repräsentiert die Energie des magnetischen Feldes, welches den plötzlich in den Stromkreis zurückführenden Draht umgiebt. Der bei Stromschluss entstehende Extrastrom ist entgegengesetzt gerichtet und giebt keinen Funken, hindert jedoch den Batteriestrom, sofort seine volle Stärke zu erreichen. Der bei Stromunterbrechung entstehende Extrastrom ist ein gleichgerichteter, und hält daher die Stromstärke noch aufrecht, in dem Augenblicke, wo der Strom verschwinden will. Um die störenden Wirkungen der Selbstinduktion zu vermeiden, werden Widerstandsrollen stets so gewunden, dass die über einander liegenden Windungen entgegengesetzt gerichtet sind (Art. 409).

Selbst wenn ein Stromleiter aus zwei parallelen geraden Drähten besteht, entsteht zwischen ihnen ein magnetisches Feld, welches induktiv wirkt. Der Koeffizient der Selbstinduktion für zwei Drähte von der Länge l und dem Radius a bei einem Achsenabstande b beträgt:

$$L = l\left(\frac{\mu}{2} + 4\,\text{lognat.}\,\frac{b}{a\,l}\right).\,10^{-9}$$

wo L in Henry, a, b und l in Zentimetern ausgedrückt sind; μ ist die Permeabilität des Drahtes.

455. Die Gleichung von Helmholtz; Zeitkonstante. Aus dem Vorhergehenden ergiebt sich, dass jedesmal, wo ein Strom zu fliessen anfängt, eine *veränderliche Periode* eintritt, bis der Strom zu derjenigen Stärke anwächst, welche er erreicht, wenn er beständig ist, d. h. zu der durch das Ohm'sche Gesetz bestimmten Stärke. Während der veränderlichen Periode ist jedoch das Gesetz nicht anwendbar.

v. Helmholtz untersuchte auf mathematischem Wege den Einfluss der Selbstinduktion auf die Stromstärke und leitete folgende wichtige Gleichungen ab, welche das Verhältnis der Selbstinduktion eines Stromleiters zu der Zeit angeben, welche erforderlich ist, damit der Strom seine volle Stärke erlangt.

Es bedeute dt ein sehr kurzes Zeitintervall, in welchem der Strom von C auf $C + dC$ wachsen möge. Die wirkliche Zunahme während des Intervalls ist dC und die Geschwindigkeit, mit welcher der Strom zunimmt, ist $\frac{dC}{dt}$. Bezeichnet man den Koeffizienten der Selbstinduktion mit L, so ist die E.M.K. der Selbstinduktion gleich $-L \cdot \frac{dC}{dt}$, und, wenn R der gesamte Widerstand des Stromleiters ist, so beträgt die Stärke des entgegengesetzten Extrastromes $-\frac{L}{R} \cdot \frac{dC}{dt}$ während des kurzen Intervalls dt; und folglich ist die wirkliche Stärke des Stromes, welcher während jenes kurzen Intervalls in dem Stromleiter fliesst, nicht $C = \frac{E}{R}$ (wie das Ohm'sche Gesetz ergeben würde, wenn der Strom konstant wäre), sondern:

$$C = \frac{E}{R} - \frac{L}{R} \cdot \frac{dC}{dt}.$$

Um die Stromstärke zu finden, welche der Strom nach der Zeit t erreicht haben wird, wo t aus unendlich vielen solcher kleinen Intervalle besteht, ist eine Anwendung der Integralrechnung erforderlich, welche sofort folgendes Resultat liefert:

$$C = \frac{E}{R}\left(1 - e^{-\frac{Rt}{L}}\right),$$

wo e die Basis der natürlichen Logarithmen ist. In Worten heisst dies, dass nach Verlauf von t Sekunden *die Selbstinduktion in einem Stromleiter beim Schliessen desselben die Stromstärke um eine Grösse von folgender Beschaffenheit vermindert: Der Logarithmus vom reciproken Werte dieser Grösse ist dem Koeffizienten der Selbstinduktion umgekehrt, und dem Widerstande des Stromleiters, sowie der Zeit, welche seit dem Schliessen des Stromleiters verflossen ist, direkt proportional.*

Die Grösse $\frac{L}{R}$, deren reciproker Wert in dem Exponentialausdruck auftritt, heisst die *Zeitkonstante* des Stromleiters. Es

ist die Zeit, welche der Strom gebraucht, um auf einen gewissen Bruchteil, $\frac{e-1}{e} = 0{,}634$, seines Endwertes zu steigen.

Eine kurze Ueberlegung lässt erkennen, dass für den Fall, wo der Koeffizient der Selbstinduktion L im Verhältnis zum Widerstande R klein ist, so dass auch die Zeitkonstante klein ist, der Ausdruck $e^{-\frac{Rt}{L}}$ für alle messbaren Werte von t aus der Gleichung verschwindet.

Ist andrerseits L gross im Verhältnis zu R, so wird der Strom während seines Anwachsens fast gänzlich von der Selbstinduktion beeinflusst und nicht von dem Widerstande des Stromleiters, welcher so wirkt, als ob sein Widerstand $= \frac{L}{t}$ wäre.

Diese Verhältnisse sind in Fig. 235 graphisch veranschaulicht, wo zwei Kurven der Stromzunahme verzeichnet sind.

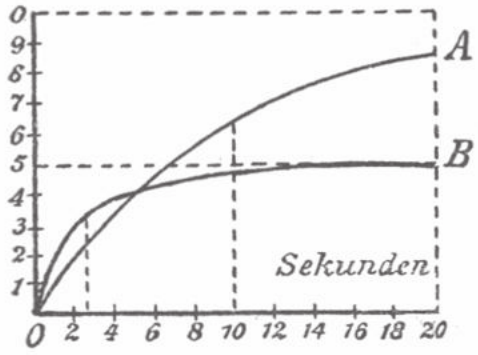


Fig. 235.

Bei einem Stromleiter sei $E = 10$ Volt, $R = 1$ Ohm, $L = 10$ Henry. Der konstante Strom beträgt 10 Ampère, nach Verlauf einer Sekunde jedoch nur 0,95 Ampère, wie man mit Hilfe der Gleichung von Helmholtz berechnen kann; nach 2 Sekunden beträgt er 1,81; nach 5 Sekunden 3,95 und nach 10 Sekunden 6,34 Ampère (vergl. die Kurve A). Nach Verlauf einer Minute beträgt er 9,975 Ampère. Wir wollen nun annehmen, der Widerstand sei auf 2 Ohm verstärkt, und der Koeffizient der Selbstinduktion auf 5 Henry reduziert. Die schliessliche Stromstärke beträgt dann nicht 10, sondern 5 Ampère, doch wird der Strom schneller anwachsen als vorher (vergl. Kurve B). Nach Verlauf einer Sekunde beträgt er 1,647 Ampère, nach 2 Sekunden 2,755 und nach 10 Sekunden 4,91 Ampère. Hieraus schliessen wir, dass es bei allen Apparaten, welche schnell wirken sollen (Relais, Telephone, Chronographen etc.) viel wichtiger ist, den Koeffizienten der Selbstinduktion als den

Widerstand des Stromleiters zu reduzieren. Wir erkennen auch, dass die so oft gegebene Regel (Art. 402), den innern Widerstand einer Batterie gleich dem äussern zu machen, für den Fall einer schnellen Wirkung durchaus nicht zutrifft. Hat der Stromleiter sowohl Selbstinduktion wie Widerstand, dann ist es besser, die Elemente der Batterie so zu gruppieren, dass der Widerstand ein grösserer ist, d. h. dieselben in Serien aufzustellen.

In der That, der ganze Verlauf ist derart, als ob zur Zeit t nach dem Schliessen zwei Ströme gleichzeitig vorhanden wären und zwar in entgegesetzten Richtungen: Der gewöhnliche Strom, welcher vom ersten Augenblicke an in voller Stärke fliesst und dann der Extrastrom von der Stärke $-\frac{E}{R}e^{-\frac{Rt}{L}}$; der wirkliche Strom ist gleich der Differenz beider.

Beim Unterbrechen des Stromes ist der Verlauf ein solcher, als wenn über dem gewöhnlichen Strome, welcher plötzlich gleich Null geworden ist, noch ein Extrastrom fliesst, der die Stärke $+\frac{E}{R}.e^{-\frac{Rt}{L}}$ hat. In diesem Falle wird jedoch die Rechnung hinfällig, da in den Stromleiter ein Widerstand von unbekannter Grösse eingeführt wird (der Widerstand längs eines Funkens ist unbestimmt). Wir wissen, dass R sehr gross ist, folglich ist die Aenderung plötzlicher und die selbstinduzierte E.M.K. ist beim Unterbrechen bedeutend grösser als beim Schliessen. Die selbstinduzierte E.M.K. würde durch den Ausdruck $E_t = E.e^{-\frac{Rt}{L}}$ gegeben sein.

Diesen Ausdruck möge man mit demjenigen für die E.M.K. der Entladung eines Kondensators von der Kapazität K durch einen Widerstand R vergleichen (s. Art. 321), nämlich $V_t = V_o.e^{-\frac{t}{KR}}$. Hieraus scheint hervorzugehen, dass bei der Entladung eines Kondensators die Grösse $K.R$ ebenso wirkt wie die Zeitkonstante $\frac{L}{R}$ im Falle der Selbstinduktion.

Die wirkliche Menge der Elektrizität, welche von dem

Extrastrome befördert wird, ist gleich derjenigen, welche ein Strom von der Stärke $\frac{E}{R}$ während der Zeit $\frac{L}{R}$ befördern würde, d. h. $= \frac{EL}{R^2}$. Beim Schliessen des Stromes hat die Verzögerung zur Folge, dass eine elektrische Menge $q = \frac{EL}{R^2}$ weniger befördert wird. Die Energie, welche ausserhalb des Drahtes aufgespeichert wird, während der Strom von Null bis zu seiner schliesslichen Stärke C anwächst, beträgt $\frac{1}{2} q \,.\, E = \frac{1}{2} L \,.\, C^2$.

KAPITEL X.

DYNAMOMASCHINEN UND TRANSFORMATOREN.

XLII. VORLESUNG: *Magnetelektrische und dynamoelektrische Maschinen.*

456. Einfache magnetelektrische Maschinen. Faraday's Entdeckung, dass in einem Drahte, welcher in einem magnetischen Felde bewegt wird, ein Strom induziert wird, führte zur Konstruktion von **magnetelektrischen Maschinen**, um mit denselben statt mit Volta'schen Batterieen Ströme zu erzeugen. Faraday selbst konstruierte im Jahre 1831 die ersten derartigen Maschinen (Fig. 236). Bei den ersten Versuchen von Pixii (1833), Saxton und Clarke, wurden Spulen von isoliertem Drahte auf einer Achse befestigt und vor den Polen starker Stahlmagnete in schnelle Rotation versetzt. Da jedoch die auf diese Weise erzeugten Ströme abwechselnd entgegengesetzte Richtung hatten, wurde ein *Kommutator* (welcher mit den Spiralen rotierte), an der Achse befestigt, damit die successiven Ströme sämtlich dieselbe Richtung erhielten. Fig. 236 veranschaulicht die von Sturgeon im Jahre 1836 befolgte Methode, bei der mittelst einer gespaltenen Kupferröhre die Verbindung mit dem äussern Stromleiter bei jeder halben Umdrehung gewechselt wurde.

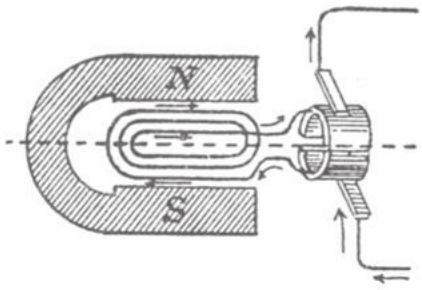


Fig. 236.

In der Figur rotiert die Drahtspule um eine Längsachse, wobei der obere Teil sich zum Beobachter bewegt. Die Pfeile geben die Richtung der induzierten Ströme an, welche von dem Kommutator an die Kontaktbürsten abgegeben werden. Die kleinen magnetelektrischen Maschinen, welche noch heute bei Mechanikern käuflich sind, beruhen auf diesem Prinzipe. Holmes und van Malderen konstruierten kräftigere Maschinen, wobei es dem letztern gelang, näherungsweise einen kontinuierlichen Strom zu erhalten, indem er 64 einzelne Rollen an einer gemeinschaftlichen Achse befestigte und dieselben zwischen den Polen von 4 kräftigen Magneten rotieren liess.

Im Jahre 1856 erfand Siemens eine verbesserte Armatur, bei welcher die Drahtrollen *der Länge nach* um eine Spindel von besonderer Form gewunden wurden, wobei er den Vorteil hatte, dass er eine grössere Anzahl von Kraftlinien durchschneiden konnte, wenn die Rollen in einem kräftigen »Felde« zwischen den Polen einer Reihe von neben einander befindlichen Stahlmagneten rotieren. Die nächste von Wilde herrührende Verbesserung war die Verwendung von Elektromagneten an Stelle der Stahlmagnete, welche das »Feld« erzeugten, in welchem die Armatur rotierte; diese Elektromagnete wurden durch Ströme erregt, welche eine kleine magnetelektrische Hilfsmaschine lieferte, die ebenfalls in Rotation erhalten wurde. Werden die Ströme nicht kommutiert, sondern die Enden der rotierenden Spule mit ein Paar Kontaktringen verbunden, gegen welche 2 Bürsten drücken, so giebt die Maschine *Wechselströme*. Fig. 237 veranschaulicht eine primitive Form einer *Wechselstrommaschine*. Ist die induzierte E.M.K. in den Drähten, wenn sie sich am *N*-Pole vorbei zum Beobachter bewegen, von links nach rechts gerichtet, so werden die beiden Kontaktringe bei jeder halben Umdrehung abwechselnd positiv und negativ.

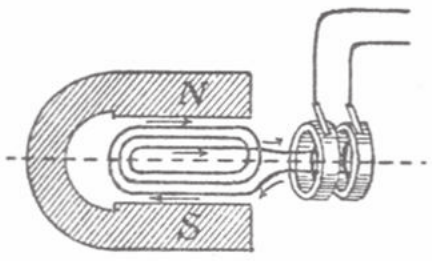


Fig. 237.

457. **Dynamo-elektrische Maschinen.** Den Namen

Dynamoelektrische Maschine oder kurz *Dynamo* führt jede Maschine, welche mechanische Kraft in elektrische Kraft umwandelt durch Erzeugung relativer Bewegung zwischen Magneten und Konduktoren. Der als Magnet wirkende Teil heisst *Feldmagnet.* Bei den Gleichstrom-Generatoren ist er gewöhnlich feststehend; bei einigen Wechselstrommaschinen lässt man ihn rotieren. Seine Aufgabe ist, eine grosse Anzahl magnetischer Linien zu schaffen. Der als aktiver Konduktor wirkende Teil, welcher die magnetischen Linien durchschneidet und in welchem die E.M.K. induziert wird, heisst die *Armatur.* Bei Gleichstrom-Generatoren rotiert die Armatur zwischen den Polen des Feldmagnets; bei einigen Wechselstrommaschinen steht dieselbe fest. Bei den ältesten Maschinen wurde der Magnetismus der Feldmagnete extra erregt. Hjorth, Murray, S. A. Varley und Andere machten verschiedentlich den Vorschlag, die in der Armatur erzeugten Ströme zur Erregung der Feldmagnete zu benutzen. Dies geschah im Jahre 1867 von Varley, Siemens und Wheatstone. Der schwache Strom, welcher durch den schwachen, zurückgebliebenen Magnetismus induziert wird, wird um den Elektromagnet geschickt, um seinen Magnetismus zu verstärken und denselben dadurch in den Stand zu setzen, noch stärkere Ströme zu induzieren. Diese selbsterregenden Maschinen nannte Siemens **Dynamo-elektrische** Maschinen oder Generatoren, zur Unterscheidung von denjenigen Generatoren, bei denen permanente Stahlmagnete zur Anwendung kamen. In beiden Fällen ist der Strom eine Folge magnetelektrischer Induktion, und in beiden Fällen stammt die Energie der auf diese Weise induzierten Ströme von der dynamischen Kraft der Dampfmaschine oder des Motors, welcher die Drahtspulen in dem magnetischen Felde rotieren lässt. Doch ist der Name auf alle Generatoren übertragen worden, ob selbsterregend oder nicht. In jedem Falle ist die erzeugte E.M.K. der Anzahl der Drahtwindungen in der rotierenden Armatur, und der Umdrehungsgeschwindigkeit proportional. Sind Ströme von geringer E.M.K., aber von bedeutender Stärke erforderlich, wie bei der galvanischen Ver-

silberung, so dürfen die rotierenden Armaturen des Generators keinen grossen innern Widerstand haben und müssen daher aus wenigen Windungen eines starken Drahtes oder aus bandförmigen Kupferstreifen bestehen. Um Ströme von hoher E.M.K. zu erzeugen, muss die Armatur aus *zahlreichen* Drahtwindungen oder aus in geeigneter Weise verbundenen Kupferstäben bestehen und muss in einem sehr kräftigen magnetischen Felde rotieren.

458. Dynamomaschinen mit kontinuierlichen Strömen. Die verschiedenen Dynamomaschinen unterscheiden sich von einander durch die Aufstellung ihrer Feldmagnete und durch die Art und Weise, wie für eine Kontinuität der induzierten Ströme gesorgt wird. Die meisten Dynamomaschinen mit kontinuierlichen Strömen haben einen einfachen Feldmagnet mit 2 Polen; doch giebt es auch solche mit 4, 6 oder 8 Polen. Die modernen Armaturen sind sehr kompliziert. Eine einfache Spule, wie in Fig. 236, mit einem zweiteiligen Kommutator liefert keinen beständigen Strom, denn die E.M.K. nimmt bei jeder Umdrehung zweimal bis auf Null ab. Die Spulen müssen so angeordnet werden, dass stets einige von ihnen thätig sind. Bei den meisten Dynamomaschinen wird die Armatur als *geschlossene Spule* konstruiert, indem der Draht auf einen *ringförmigen* Eisenkern gewickelt wird (wie bei Pacinotti und Gramme), oder als *Trommel* über einen *cylindrischen* Kern (wie bei Siemens oder von Hefner), oder mit flachen *scheibenförmigen* Spulen (Desrozier). Stets sind die Wickelungen derart verbunden (vergl. Fig. 184), dass die Spule ohne Ende ist. Wird der Strom auf der einen Seite einer solchen Spule eingeführt und auf der andern Seite abgeleitet, so giebt es zwei Bahnen durch die Spule hindurch. Da dieselbe zwischen den Polen des Magnets rotiert, so haben die elektromotorischen Kräfte, welche in den aufsteigenden und niedersteigenden Teilen induziert werden, das Bestreben, die Ströme parallel durch diese Teile zu schicken; folglich muss man an geeigneten Stellen Kontaktbürsten anbringen, um diese Ströme aus den rotierenden Spulen abzuleiten. Die Bürsten hat man jedoch nicht mit den Spulen selbst, sondern mit einem

Kommutator (Fig. 238) in Verbindung zu bringen, der aus einer Reihe von Kupferstäben besteht, die von einander isoliert und mit der Armatur in regelmässigen Abständen verbunden sind. Betrachten wir z. B. einen Gramme'schen Ring, der gewissermaßen aus einer Reihe von Spulen zusammengesetzt ist, die auf einen ringförmigen Eisendraht gewickelt sind. Jede Spule repräsentiert einen Abschnitt der Wickelung, und alle stehen mit einander in Verbindung, das Ende des einen Abschnitts mit dem Anfang der nächsten, und jede dieser Verbindungen ist mit einem Stabe des Kommutators verbunden. Der Strom kann nicht von einem Stabe des Kommutators auf den nächsten übergehen, ohne den dazwischen befindlichen Abschnitt der Wickelung zu durchfliessen. Der Kommutator rotiert mit der Armatur, während die *Bürsten*, welche in passende Halter eingefügt sind, gegen seine Oberfläche drücken und so eingestellt sind, dass der Strom möglichst ohne Funkensprühen in sie eintritt. Um Funkensprühen zu vermeiden, hat man die Bürsten etwas vor dem symmetrisch zwischen den Polen liegenden Durchmesser anzubringen; denn der Strom wird in jedem Abschnitt der Wickelung beim Durchgange unter der Bürste umgekehrt und muss sich deshalb in diesem Augenblicke in einem magnetischen Felde von hinreichender Stärke bewegen. Der Strom in der Armatur übt eine magnetisierende Wirkung aus und ist bestrebt, das magnetische Feld in der Richtung der Rotation zu verschieben. Um dies möglichst zu verhindern, verwendet man einen sehr kräftigen, massiven Feldmagnet. Die Bürsten, welche den Strom aufnehmen, waren ursprünglich elastische Drahtbündel; bei den modernen Maschinen sind sie aus Kupferstreifen oder Kupfergaze zusammengesetzt oder bestehen aus kleinen Kohleklötzen. Fig. 239 veranschaulicht den Typus einer modernen Dynamo, mit einem vertikalen Magnet aus massivem Schmiede-

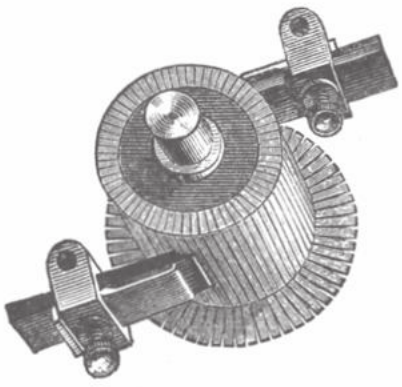


Fig. 238.

eisen, der durch Ströme magnetisiert wird, die in den auf beide Schenkel gewundenen Spiralen fliessen. Unten zwischen den ausgehöhlten Polflächen befindet sich die rotierende Armatur

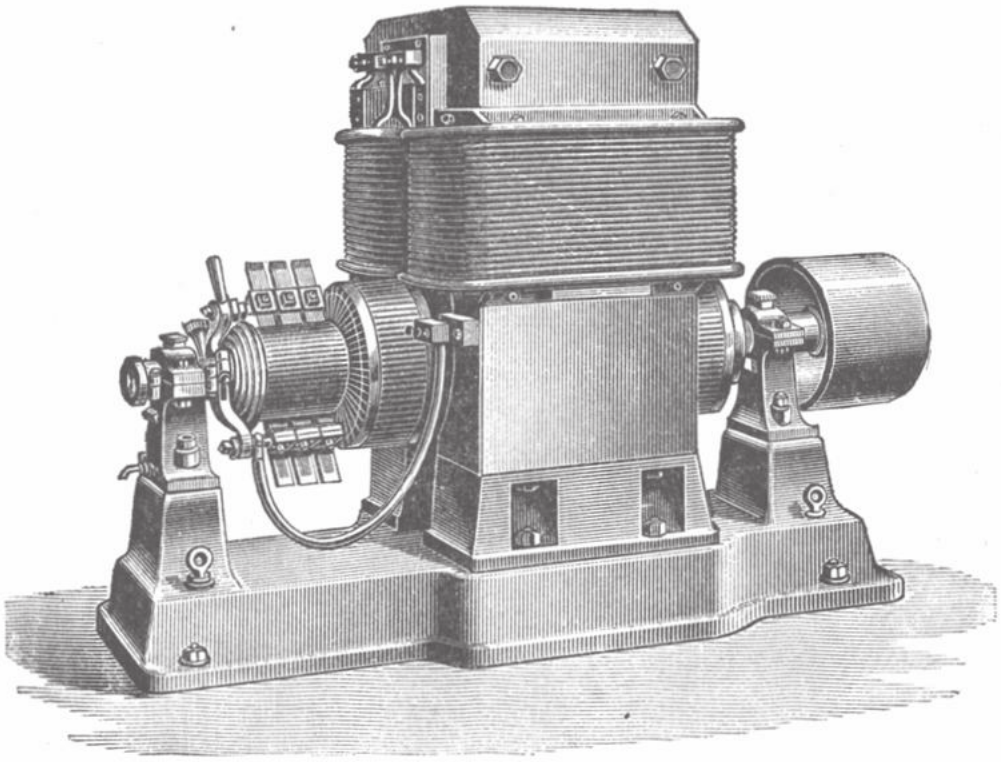


Fig. 239.

(in diesem Falle eine Trommelarmatur) mit dem Kommutator und den Bürsten. Der Kern der Armatur besteht aus dünnen Eisenplatten, welche von einander isoliert sind, um Wirbelströme zu verhüten.

Alle Dynamomaschinen mit kontinuierlichen Strömen laufen als Motoren (Art. 438), wenn dieselben durch einen Strom mit geeigneten Volt gespeist werden [1]).

459. Berechnungen bei Dynamomaschinen. Bei einer Dynamo mit 2 Polen sei N die Gesamtzahl der magnetischen Linien, welche der Feldmagnet durch die Armatur schickt, S sei die Anzahl der Drähte auf der Armatur, und n die Zahl der Umdrehungen pro Sekunde, so beträgt die durch die rotierende Armatur erzeugte elektromotorische Kraft:

---

1) Die genauere Beschreibung der Dynamomaschinen, sowie Ausführliches über sachgemäße Konstruktion lese man in des Verfassers Lehrbuch über Dynamoelektrisches Maschinenwesen nach.

$$E = \frac{n \,.\, S \,.\, N}{10^8},$$

denn das Schneiden der magnetischen Linien in einer Sekunde ist jeder dieser 3 Grössen proportional. Wir dividieren durch 10^8, um auf Volt zu reduzieren Falls ein innerer Widerstand r vorhanden ist, sind ebenso wie bei Batterieen (Art. 166) die nutzbaren Volt um $r.C$ geringer als die in Summa erzeugten Volt, d. h.

$$V = E - r.C.$$

Da der elektrische Nutzeffekt der Maschine gleich dem Verhältniss $V : E$ ist, so folgt, dass r möglichst klein zu machen ist.

Beispiel. Für eine Dynamo sei $N = 7{,}170{,}000$ und $S = 120$; es werden 780 Umdrehungen in der Minute gemacht (d. h. 13 pro Sekunde), dann beträgt die erzeugte E.M.K. $= 111$ Volt. Ist $r = 0{,}033$ Ohm und $C = 210$ Ampère, so ist $r \,.\, C = 7$ Volt. Folglich $V = 104$ Volt.

Der Strom C, welchen eine Dynamo liefert, hängt von dem Widerstande etc. der Stromleitung ab. Das Maximum, welches sie an Strom abgeben kann, wird durch verschiedene Umstände bedingt, wie von der Erwärmung ihrer Teile, vom Funkensprühen an den Bürsten, welches sehr in Frage kommt, wenn die Maschine zu viel Strom abgiebt, von der mechanischen Stärke ihrer Teile, sowie von der Kraft der treibenden Dampfmaschine.

Die *Brutto-Kraft* einer Dynamo ist gleich dem Produkte der Ampère und der gesamten erzeugten E.M.K., also gleich $C \,.\, E$. Die *Netto-Kraft* ist gleich dem Produkte der Ampère und der Volt an den Polen, d. h. gleich $C \,.\, V$. Diese Zahlen werden durch Division mit 746 auf Pferdekräfte reduziert. Der *Nutzeffekt* einer Dynamo ist das Verhältnis der Netto-Kraft zur mechanischen Kraft, welche zum Betreiben der Maschine verwandt wird.

Alle Konduktoren an der Armatur einer Dynamo sind, wenn die Maschine läuft, einem mechanischen Zuge unterworfen, welcher der Umdrehung entgegengesetzt ist. Dies ist eine Folge der Wirkung des magnetischen Feldes auf den Strom (Art. 335).

Etwas Kraft wird auch von den Wirbelströmen (Art. 452)

und von der Verzögerung in dem Kerne der Armatur (Art. 363) verbraucht, sowie von den Wirbelströmen (Art. 458) in den rotierenden Metallmassen. Bei gut konstruierten Maschinen sind diese Verluste jedoch nur gering.

460. Erregung der Feldmagnete. Es giebt verschiedene Methoden, um den Magnetismus der Feldmagnete zu erregen, und dementsprechend haben wir folgende Einteilung:

1) *Magnet-Maschinen*, mit permanenten Stahlmagneten.

2) *Magnetelektrische mit besonderem Erreger;* hier werden die Ströme, welche zur Erregung der Feldmagnete benutzt werden, von einer besondern Maschine, dem *Erreger*, geliefert.

3) *Dynamo mit besonderer Spule*, welche man auf die Armatur wickelt, um den erregenden Strom zu erzeugen.

4) *Serien-Dynamo*, wo die Spulen des Feldmagnets in Serien verbunden sind mit denen der Armatur und dem äussern Stromkreise. Sie bestehen aus wenigen Windungen eines dicken Drahtes (Fig. 240).

5) *Dynamo mit Nebenschluss;* die Spulen des Feldmagnets bilden einen Nebenschluss zu dem Hauptstromkreise. Da sie aus zahlreichen, dünnen Drahtwindungen bestehen, so leiten sie nur einen kleinen Teil des gesamten Stromes ab (Fig. 241).

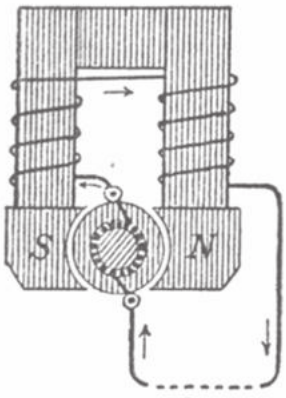


Fig. 240.

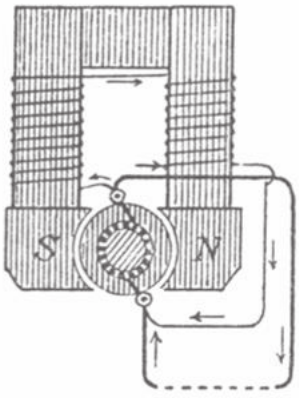


Fig. 241.

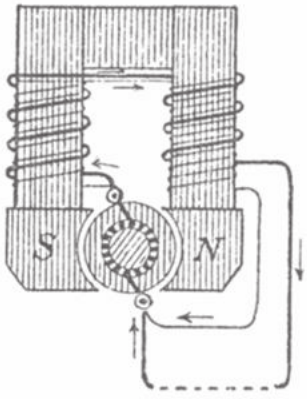


Fig. 242.

6) *Compound-Dynamo*, wo die Erregung teils mittelst eines Nebenschlusses, teils durch Serien-Spulen stattfindet (Fig. 242).

Jede Art der Wickelung hat ihre besonderen Vorteile.

461. Charakteristische Kurven. Um die Wirkungsweise der verschiedenen Arten der Dynamomaschinen zu er-

kennen, erfand Hopkinson die Methode der *charakteristischen Kurven*, bei welcher die beiden Elemente der Kraftleistung, die Volt und die Ampère, graphisch verzeichnet werden. Wird eine Serien-Dynamo mittelst Ampèrometer und Voltmeter geprüft, während sie mit konstanter Geschwindigkeit bei verschiedenen Belastungen läuft, so ergiebt sich eine Kurve ähnlich OQV (Fig. 243), wo die äussern Volt vertikal, die Ampère horizontal verzeichnet sind. Dies ist die äussere charakteristische Kurve. Nimmt der Strom zu, so steigen die Volt infolge der zunehmenden Magnetisierung; ist diese jedoch nahe an der Sättigung, so nehmen die Volt ab infolge des innern Widerstandes und verschiedener Reaktionen. In einem beliebigen Punkte Q wird der Widerstand des äussern Stromkreises durch die Neigung der Linie QO dargestellt, d. h. durch die trigonometrische Tangente des Winkels QOX, denn tan $QOX = QM : OM$ gleich dem Verhältnis der Volt zu den Ampère. Ziehen wir eine Linie $Q\mathcal{J}$ derart, dass tan $\mathcal{J}OX$ gleich dem innern Widerstande ist, so repräsentiert MN die verloren gegangenen Volt, wenn der Strom $= OM$ ist. Fügen wir der Strecke QM noch ein Stück $PQ = MN$ hinzu, so erhalten wir PM, den entsprechenden Wert der gesamten E.M.K. Auf diese Weise können wir aus der Kurve OV die charakteristische Kurve OE ableiten. Wird der gesamte Widerstand (d. h. die Neigung der Linie OP) vermehrt, so bewegt sich P längs der Kurve abwärts nach O, und von einer gewissen Stelle an wird jede weitere Zunahme in der Neigung zur Folge haben, dass die Volt und Ampère schnell abnehmen und fast bis auf Null sinken. Dies ist eine Eigentümlichkeit der Serien-Maschinen; laufen dieselben mit einer gewissen Geschwindigkeit, so versagt ihr Strom, sobald der Widerstand eine gewisse kritische Grösse überschreitet, die von der Konstruktion der einzelnen Maschine abhängt.

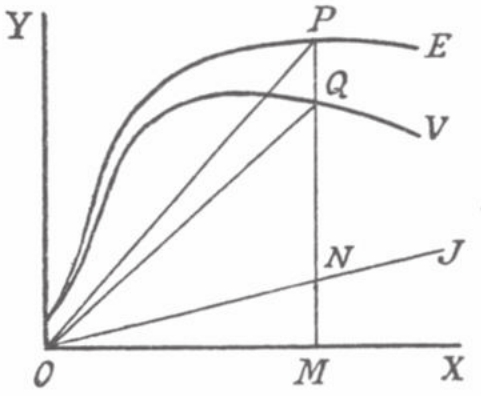


Fig. 243.

Bei einer Maschine mit Nebenschluss hat die charakteristische Kurve eine andere Gestalt. Ist der Stromkreis offen, und kein äusserer Strom vorhanden, so ist der Strom im Nebenschluss voll in Thätigkeit, um den Magnet zu erregen. Die Volt-Kurve *YV* beginnt mit einem hohen Werte, und da der Strom durch Verminderung des Widerstandes verstärkt wird, so nehmen die Volt langsam ab. Diese Abnahme ist teils eine Folge des innern Widerstandes, teils eine Folge von Reaktionen der Armatur, teils rührt sie von der Reduktion des Stromes im Nebenschluss her. Wenn die Neigung der Geraden *OJ* den innern Widerstand darstellt, so können wir die verloren gegangenen Volt *MN* bestimmen und diese oberhalb des Punktes *Q* hinzufügen. Wir erhalten dann einen Punkt *P*, welcher auf der Kurve der totalen E.M.K. liegt. Auch diese Kurve fällt langsam. Wenn eine Maschine mit Nebenschluss einen kurzen Stromkreis hat, so nimmt ihr Magnetismus plötzlich fast bis auf Null ab. Um die Volt einer solchen Maschine zu regulieren, lässt sich ein geeigneter Rheostat (Fig. 200) in den Nebenschluss einschalten, um den erregenden Strom zu verändern.

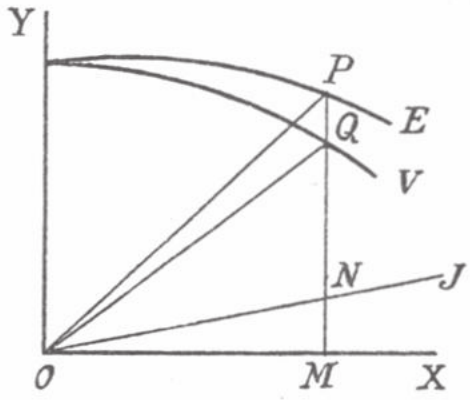


Fig. 244.

462. Maschinen mit konstanten Volts. Zur Speisung von Glühlampen sind Maschinen erforderlich, welche mit konstanter Spannung arbeiten, gleichviel, ob der in die Hauptleitung fliessende Strom stark oder schwach ist. Der von der Maschine abgegebene Strom reguliert sich selbst genau nach Bedarf; indem mehr Strom fliesst, wenn mehr Lampen eingeschaltet werden, vorausgesetzt, dass die Potentialdifferenz der Hauptstränge konstant erhalten wird. Für diesen Zweck genügt weder eine Serien-Dynamo noch eine mit konstanter Geschwindigkeit laufende Maschine mit Nebenschluss; letztere höchstens bei geeigneter Regulierung. Man hat zu beobachten, dass bei Maschinen mit Nebenschluss die charakteristische Kurve fällt, wenn die Strom-

stärke zunimmt, während die Kurve bei einer Serien-Dynamo steigt. Demnach lässt sich die Zahl der Volt merklich konstant erhalten, wenn man eine *Compound-Wicklung* benutzt, bestehend aus einer Nebenschlusswicklung (um einem offenen Stromkreise die geeignete Zahl der Volt zu geben), und aus ein paar Wicklungen dicken Drahtes, in Serien mit dem Hauptstrange verbunden (um die Erregung im Verhältnis der Kraftabgabe zu steigern).

463. Maschinen mit konstanter Stromstärke. Um einen unveränderlichen Strom in einer Serie von Lampen zu erhalten, wie es bei Bogenlichtbeleuchtung oft erforderlich ist, (Art. 443) benutzt man besondere Dynamomaschinen, die unter dem Namen von *Bogenlicht-Maschinen* bekannt sind. Die besten dieser Art sind die von Brush und die von Thomson-Houston. Beide haben Armaturen mit offenen Spulen (wo die Spulen nicht in einem geschlossenen Stromleiter angeordnet sind), mit besondern Kommutatoren und automatischen Vorrichtungen, um die Kraftabgabe zu regulieren, entweder durch Nebenschluss des erregenden Stromes oder durch Verschiebung der Bürsten. Der Strom lässt sich auf diese Weise z. B. auf 10 Ampère erhalten, während die Volt je nach der Zahl der im Stromkreise befindlichen Lampen zwischen 50 bis 2000 schwanken.

464. Unipolar-Maschinen. Es giebt noch eine andere Gruppe von dynamoelektrischen Maschinen, welche sich wesentlich von allen bisher genannten unterscheiden. Bei diesen Maschinen rotiert eine Spule oder ein anderer beweglicher Konduktor um einen Magnetpol und durchschneidet dabei die magnetischen Kraftlinien in kontinuierlicher Weise, ohne dass eine Umkehr in der Richtung der induzierten Ströme stattfindet. Solche Maschinen heissen Unipolar-Maschinen. Dieselben haben jedoch nur eine sehr geringe E.M.K. und sind in der Praxis nicht verwendbar. Faraday's Scheibenmaschine (Fig. 126) gehört dieser Gruppe an.

XLIII. VORLESUNG: *Wechselströme.*

465. Periodische Ströme. Wir haben gesehen, dass die Rotation einer einfachen Spule in einem magnetischen Felde elektromotorische Kräfte ins Leben ruft, deren Richtung sich bei jeder halben Umdrehung ändert, und welche daher *Wechselströme* erzeugen. Bei jeder ganzen Umdrehung tritt eine E.M.K. auf, welche bis zu einem Maximum steigt und dann bis Null abnimmt, worauf ihr unmittelbar eine entgegengesetzt gerichtete E.M.K. folgt, welche ebenfalls ein Maximum erreicht und dann bis Null abnimmt. Jede solche Operationsreihe heisst eine *Periode*, und die Anzahl der in einer Sekunde erfolgten Perioden heisst die *Frequenz* oder *Periodizität* und soll im folgenden mit dem Buchstaben n bezeichnet werden. Bei den Maschinen mit 2 Polen ist n gleichbedeutend mit der Anzahl der Umdrehungen pro Sekunde; bei Maschinen mit mehreren Polen dagegen wächst n proportional mit der Anzahl der Polpaare. Bei einer Umdrehung in einem gleichförmigen Felde sind die hervorgerufenen elektromotorischen Kräfte dem sinus des Winkels proportional, um welchen sich die Spule gedreht hat, von der Lage an gerechnet, wo sie quer zum Felde liegt. Sei N die Anzahl der magnetischen Linien, welche in dieser Lage durch die Spule gehen, und S die Anzahl der Windungen der Spule, so ist der Wert der induzierten E.M.K. zur Zeit t, wo die Spule sich um den Winkel $\Theta (= 2\pi nt)$ gedreht hat,

$$E_\Theta = 2\pi nSN \sin\Theta : 10^8 = D \,.\, \sin\Theta,$$

wenn wir zur Abkürzung $2\pi nSN : 10^8 = D$ setzen.

In Wirklichkeit sind die magnetischen Felder nicht gleichförmig und die Spulen nicht einfache Schleifen, so dass das periodische Wachsen und Abnehmen der elektromotorischen Kräfte nicht notwendig einem einfachen Sinusgesetze folgt. Die Form der Wellen hängt ab von der Gestalt der Polflächen sowie von der Form und Breite der Spulen. In den meisten Fällen sind wir jedoch zu der Annahme berechtigt, dass die erzeugte

E.M.K. angenähert einem Sinusgesetze folgt, so dass sich ihr Wert zu jeder Zeit durch die obige Formel ausdrücken lässt, wo D der Maximalwert oder die von E erreichte *Amplitude* ist, und Θ ein *Phasenwinkel* an einem gedachten Kreise. Betrachten wir einen Punkt P, welcher sich in der Richtung der Bewegung des Uhrzeigers auf einem Kreise bewegt und setzen wir den Radius dieses Kreises $= 1$, so ist PM der sinus des Winkels Θ. Teilen wir dann den Kreis in eine beliebige Anzahl gleicher Winkel und ziehen für jeden derselben die Sinuslinie, so können wir letztere in gleichen Abständen längs einer horizontalen Linie (Fig. 245) als Ordinaten antragen und erhalten auf diese Weise die Sinuslinie.

In Fig. 245 entspricht ein Umlauf des P längs des Kreises einem vollständigen Wechsel oder Cyklus. Der Wert der E.M.K.

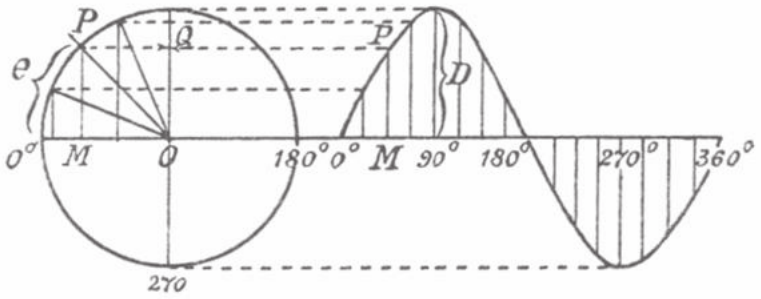


Fig. 245.

(deren Maximalwerte $+D$ und $-D$ sind) lässt sich für jeden Augenblick entweder durch die Sinuslinie PM oder durch ihre Projektion OQ auf den vertikalen Durchmesser darstellen. Wenn der Punkt P rotiert, oscilliert der Punkt Q auf diesem Durchmesser.

Die Ströme, welche von diesen periodischen oder wechselnden elektromotorischen Kräften herrühren, sind ebenfalls periodisch und wechselnd; sie wachsen zu einem Maximum an, nehmen bis Null ab, fliessen dann in entgegengesetzter Richtung, nehmen zu bis zu einem Maximum und gehen durch Null wieder in die andere Richtung über u. s. w.

Wenn die E.M.K. 100 solche Cyklen pro Sekunde durchmacht, so thut es der Strom ebenfalls.

466. Virtuelle Volt und virtuelle Ampère. Die

Messinstrumente für Wechselströme, wie z. B. die Elektrodynamometer (Art. 390), die Voltmeter von Cardew (Art. 425) und die elektrostatischen Voltmeter (Art. 285), messen nicht die arithmetischen Durchschnittswerte der Ampère oder Volt. Falls die Instrumente unter Anwendung von Gleichströmen kalibriert worden sind, so geben sie die Quadratwurzeln der mittleren Quadrate der Werte an. Mit andern Worten: sie messen die sogenannten *virtuellen Ampère* oder *virtuellen Volt.*

Der Mittelwert, welchen sie angeben, beträgt (falls wir annehmen, dass die Ströme und die Zahl der Volt das Sinusgesetz befolgen) das 0,707 fache der Maximalwerte, denn der Durchschnitt der Quadrate des sinus (in Bezug auf einen Quadranten oder einen ganzen Kreis) ist $\frac{1}{2}$; folglich ist der Wert der Quadratwurzel der mittleren Quadrate das $\frac{1}{\sqrt{2}}$ fache ihres Maximalwertes. Wird ein Voltmeter in einen Wechsel-Stromkreis geschaltet, wo die Volt zwischen + 100 und — 100 schwanken, so giebt dasselbe 70,7 Volt an; und es würden bei Anwendung von Gleichströmen 70,7 Volt erforderlich sein, um dieselbe Ablesung zu erhalten. Wenn ein Wechselstrom-Ampèrometer 100 Ampère angiebt, so steigt der Strom in Wirklichkeit auf 141,4 Ampère und sinkt dann bis auf — 141,4; aber die Wirkung ist die von 100 Gleichstrom-Ampère und daher würde ein solcher Strom als ein Strom von 100 virtuellen Ampère zu bezeichnen sein.

467. Verzögerung und Beschleunigung. Wechselströme halten nicht immer gleichen Schritt mit den im Stromkreise vorhandenen Volt. Findet im Stromkreise eine Selbstinduktion statt, so bleiben die Ströme zurück; ist Kapazität im Stromkreise, so sind sie in der Phase voraus. Fig. 246 illustriert die durch Selbstinduktion erzeugte Verzögerung. Die Maxima und Minima der Stromimpulse, welche durch die stärkere Linie dargestellt werden, treten etwas *später* ein als die der Volt. Die Selbstinduktion hat jedoch ausser der Phasenverzögerung noch eine andere Wirkung von grösserer Wichtigkeit; sie erzeugt Reaktionen auf die E.M.K., wodurch der Strom geschwächt wird.

Während der Strom an Stärke zunimmt, strebt die Selbstinduktion sein Anwachsen zu verhindern. Um einen Strom von 40 Ampère in einem Widerstande von $1\frac{1}{2}$ Ohm zu erzeugen, ist bei gleichgerichteten Strömen eine E.M.K. von 60 Volt erforderlich. Bei Wechselströmen würden 60 Volt jedoch nicht genügen, wenn Selbstinduktion in dem Stromkreise vorhanden ist. Die Sache wird noch durch

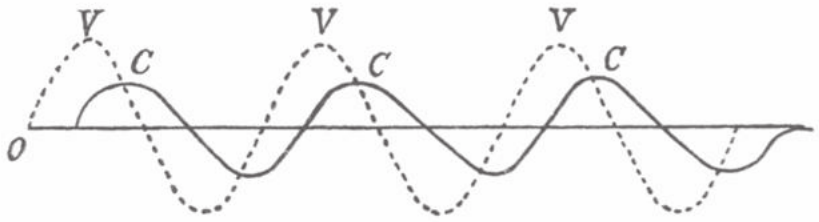


Fig. 246.

den Umstand kompliziert, dass die Impulse der gegenwirkenden elektromotorischen Kraft wieder andere Phase haben; sie sind thatsächlich $\frac{1}{4}$ Periode hinter dem Strome zurück. Fliesst ein Wechselstrom von C (virtuellen) Ampère mit einer Frequenz von n Cyklen pro Sekunde durch einen Stromleiter mit der Selbstinduktion L, so beträgt die gegenwirkende elektromotorische Kraft[1]) $2\pi nLC$ (virtuelle) Volt. Ist z. B. $L = 0{,}002$ Henry, $n = 50$ Perioden pro Sekunde und $C = 40$ Ampère, so beträgt die gegenwirkende E.M.K. 25,1 Volt. Wollen wir nun die 40 (virtuellen) Ampère nicht allein durch den Widerstand von $1\frac{1}{2}$ Ohm treiben, sondern auch dieser reagierenden Kraft entgegen, so sind mehr als 60 Volt erforderlich. Doch haben wir nicht $60 + 25{,}1$ Volt nötig, da Gegenwirkung und Strom verschiedene Phasen haben. Das Ohm'sche Gesetz verliert hier seine Giltigkeit. Um die Anzahl der erforderlichen Volt zu berechnen, nehmen wir unsere Zuflucht zur Geometrie.

---

1) Dies wird in folgender Weise berechnet. Nach Art. 453 ist $E = L \cdot \frac{dC}{dt}$. Nun ist C nach der Annahme eine Sinusfunktion der Zeit — mit dem augenblicklichen Werte $C_0 \sin 2\pi nt$, wo C_0 der Maximalwert von C ist. Differentiieren wir dies in Bezug auf die Zeit, so ergiebt sich $\frac{dC}{dt} = 2\pi n C_0 \cdot \cos 2\pi nt$. Da die »virtuellen« Werte des sin. und cos. gleich sind, haben wir für E den Wert $2\pi nLC$, der sich jedoch um $\frac{1}{4}$ Periode vom Strome unterscheidet.

Wir verzeichnen (Fig. 247) die Wellenkurve *OAbd*, welche den Volt entspricht, die erforderlich sind, um den Strom durch den Widerstand zu treiben, falls keine Selbstinduktion vorhanden

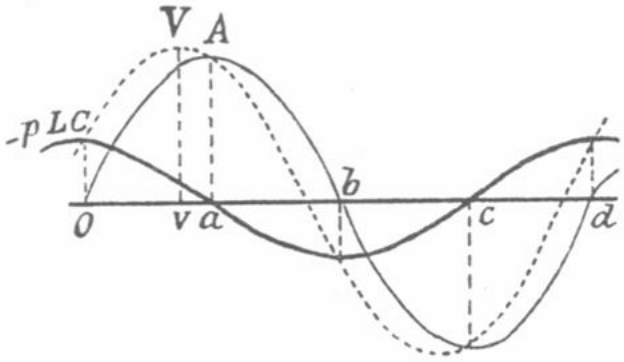


Fig. 247.

ist. Dies können wir als Stromkurve bezeichnen. Dann ziehen wir die mit $-pLC$ bezeichnete Kurve, welche die Volt repräsentiert, die erforderlich sind, um der Reaktion der Selbstinduktion das Gleichgewicht zu halten. Hierbei haben wir p statt $2\pi n$ geschrieben. Die Ordinate in O beträgt 25,1 und die Kurve ist um $\frac{1}{4}$ Periode zurück verschoben; denn wenn der Strom am stärksten wächst, wie in O, ist die Wirkung der Selbstinduktion am grössten. Dann wollen wir diese beiden Kurven kombinieren, indem wir ihre Ordinaten summieren. Wir erhalten so die punktierte Kurve, welche in V ihren Maximalpunkt hat. Dies ist die Kurve der Volt, welche dem Stromkreise zugeführt werden müssen, um den gewünschten Strom zu erzeugen. Wie man sieht, erreicht die Stromkurve ihren Maximalpunkt etwas später als die Kurve der Volt. Der Strom bleibt in der Phase hinter den Volt zurück. Ist Od die Zeit einer vollen Periode, so repräsentiert va die Zeit, welche zwischen dem Maximum der Volt und dem der Ampère verfliesst. Fig. 248 stellt dieselben Thatsachen in einem Umdrehungs-Diagramm dar, ähnlich wie Fig. 245. Die Linie OA repräsentiert die arbeitenden Volt $R.C$, während die Linie $AD \perp OA$ die durch Selbstinduktion erzeugten Volt pLC angiebt. Kombinieren wir dieselben nach dem Parallelogramm der Kräfte, so erhalten wir die Linie OD als die dem

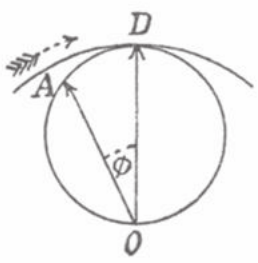


Fig. 248.

Stromkreise zugeführten Volt. Die Projektionen dieser drei Linien auf eine vertikale Linie geben, falls die Figur um das Zentrum O rotiert, die augenblicklichen Werte der drei Grössen. Der Winkel $AOD = \Phi$, um welchen der Strom hinter den Volt zurückbleibt, heisst der *Verzögerungswinkel.* Wie gross auch die Selbstinduktion oder die Frequenz sein möge, der Winkel Φ kann nie grösser als 90^0 sein. Ist $OA = 60$ und $AD = 25{,}1$, so ist $OD = 65$ Volt. Die zugeleiteten Volt müssen der Bedingung genügen: $E^2 = (RC)^2 + (pLC)^2$. Hieraus folgt:

$$C = \frac{E}{\sqrt{R^2 + p^2L^2}}.$$

Der hier auftretende Nenner heisst gewöhnlich *Impedenz.*

468. Gesetz von Maxwell. In den Fig. 249 und 250

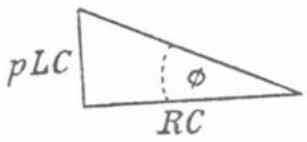


Fig. 249.

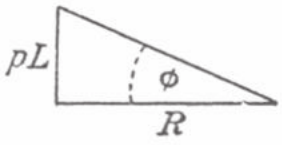


Fig. 250.

ist der Verzögerungswinkel so gezeichnet, dass

$$\tan \Phi = \frac{pLC}{RC} = \frac{pL}{R}$$

ist. Es leuchtet ein, dass die Wirkung der Selbstinduktion zur Folge hat, dass der Stromleiter so wirkt, als ob sein Widerstand von R auf $\sqrt{R^2 + p^2L^2}$ erhöht würde. In der That richtet sich der Wechselstrom nicht nach dem Widerstande des Stromleiters, sondern nach seiner Impedenz. Gleichzeitig bleibt der Strom zurück, als ob der Winkel, auf den bezogen wird, nicht Θ, sondern $\Theta - \Phi$ wäre, so dass die Gleichung für die augenblicklichen Werte von C lautet:

$$C = \frac{D \sin(\Theta - \Phi)}{\sqrt{R^2 + p^2L^2}},$$

wo $E = D \cdot \sin \Theta$ ist. Dies ist das Gesetz von Maxwell für periodische, durch Selbstinduktion verzögerte Ströme. Da die Instrumente die Phase nicht berücksichtigen, sondern virtuelle Werte geben, so ist die obige einfachere Form gewöhnlich ausreichend.

Die in einen Wechselstromkreis eingeführte Kapazität hat eine Beschleunigung der Phase zur Folge, da die Reaktion eines Kondensators den Strom rückwärts zu treiben strebt, statt ihn zu verlängern. Die Gegenwirkung ist demnach $-1:pK$, und

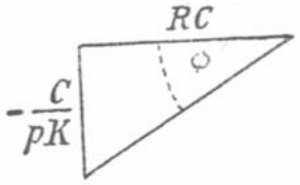


Fig. 251.

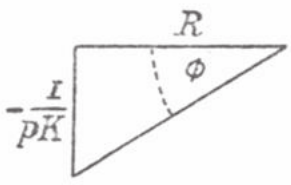


Fig. 252.

der Winkel Φ ist bestimmt durch $\tan\Phi = -1:pKR$. Die Impedenz ist $\sqrt{R^2 + 1:p^2K^2}$.

Wenn sowohl Selbstinduktion als auch Kapazität vorhanden ist, so ist $\tan\Phi = \left(pL - \frac{1}{pK}\right) : R$; die Gegenwirkung $= pL - \frac{1}{pK}$ und die Impedenz $= \sqrt{R^2 + \left(pL - \frac{1}{pK}\right)^2}$.

Da Kapazität und Selbstinduktion entgegengesetzte Wirkungen zur Folge haben, so können sie dazu benutzt werden, sich gegenseitig aufzuheben. Sie halten einander das Gleichgewicht, wenn $L = 1:p^2K$. In diesem Falle ist keine Impedenz im Stromkreise vorhanden und die Ströme befolgen das Ohm'sche Gesetz.

469. Hemmspulen. Ist in einem Stromkreise wenig Widerstand und grosse Selbstinduktion vorhanden, so hängt der Strom von letzterer ab. Ist z. B. p (oder $2\pi n$) $= 1000$ und $L =$ 10 Henry, R dagegen nur 1 Ohm, so könnten wir den Widerstand in obiger Formel vernachlässigen und das Gesetz würde einfach heissen:

$$C = E:pL.$$

Selbstinduktionsspulen mit bedeutender Selbstinduktion und geringem Widerstande wendet man häufig an, um Wechselströme zu hemmen. Dieselben heissen *Hemmspulen.*

Würde man den Strom in einen Kondensator von geringer Kapazität führen (etwa $K = 0{,}1$ Mikrofarad und $1:pK = 10{,}000$), so würde der Strom, wenn er in den Kondensator einströmt und ihn wieder verlässt, nur durch die Kapazität und Frequenz

und nicht durch den Widerstand beeinflusst werden und den Wert $C = EpK$ haben.

470. Arbeit des Wechselstromes. Wenn wir die einem Motor oder einem andern Teile eines Wechselstromkreises zugeführte Energie messen wollen, so messen wir einzeln die Ampère und die Volt mit Ampèremeter und Voltmeter und multiplizieren die Ablesungen. Wir erhalten dann als *scheinbare Watt* einen Wert, der häufig die *wahren Watt* bei weitem übertrifft. Dies ist eine Folge der Phasendifferenz, welche die Instrumente nicht berücksichtigen. Die wirkliche Energie ist $W = C.V.\cos\Phi$, wo C und V die virtuellen Werte sind und Φ der Verzögerungswinkel. Der letztere ist jedoch im allgemeinen eine unbekannte Grösse und man muss daher seine Zuflucht zu einem geeigneten Wattmeter nehmen, dessen gewöhnliche Form ein Elektrodynamometer ist (Art. 433), derartig konstruiert, dass der in ihm befindliche Stromkreis mit hohem Widerstande ohne Induktion ist.

Jedesmal wo die Phasendifferenz (gleichviel ob Verzögerung oder Beschleunigung) sehr gross ist, ist der Strom, da er mit den Volt nicht Schritt hält, fast ohne Watt. Dies ist der Fall bei Strömen, die durch eine Hemmspule oder in einen Kondensator fliessen, falls die Widerstände gering sind.

471. Hochfrequenz-Ströme. Die Reaktionen der Selbstinduktion und der Kapazität nehmen zu, wenn die Frequenz zunimmt. Die bei der elektrischen Beleuchtung benutzte Frequenz beträgt 50 bis 120 Cyklen pro Sekunde. Bei Anwendung von Hochfrequenzen von 1000 oder noch mehr Cyklen pro Sekunde ist die Reaktion ungeheuer gross. In diesem Falle fliessen die Ströme nicht gleichmässig durch den Querschnitt des Leitungsdrahtes, sondern sind hauptsächlich auf seine Oberfläche beschränkt, da selbst dicke Kupferstäbe eine grosse Impedenz bieten. Schon bei einer Frequenz von 100 beträgt der Strom in einer Tiefe von 12 mm von der Oberfläche (des Kupfers) nur noch $\frac{1}{7}$ seiner Stärke in den Oberflächenschichten. Bei Eisen beträgt die Tiefe für $\frac{1}{7}$ des Wertes ungefähr 1 mm. Bei derartig schnellen Oscillationen, wie wir sie beim Entladen

einer Leydener Flasche haben, wo die Frequenz mehrere Millionen beträgt, hat die leitende Schicht wahrscheinlich noch nicht die Dicke von 0,01 mm. Hohle Röhren leiten in solchem Falle gerade so gut, wie feste Stäbe von gleichem äusseren Durchmesser. Die Leitungsfähigkeit ist nicht dem Querschnitt, sondern dem Umfange proportional.

Jedesmal wenn ein Strom nicht gleichmässig über den Querschnitt eines Konduktors verteilt ist, tritt eine wirkliche Zunahme seines Widerstandes ein; und die Wärmewirkung ist ein Minimum, wenn der Strom gleichmässig verteilt ist. Der Umstand, dass die oscillatorischen Ströme an der Oberfläche am stärksten sind, ist der beste Beweis für die moderne Anschauungsweise, dass die Energie in einem elektrischen Stromkreise durch das umgebende Medium befördert wird, und nicht durch den Draht (vergl. Art. 514 über Energiepfade).

472. Wechselstrom-Elektromagnete. Wird ein Wechselstrom durch eine Spule geschickt, so erzeugt er ein wechselndes magnetisches Feld. Ein in dieses Feld gebrachter Eisenkern ist einer periodisch wechselnden Magnetisierung unterworfen. Elektromagnete für Wechselströme müssen lamellenartige Eisenkerne haben, um Wirbelströme zu vermeiden; infolge ihrer hemmenden Wirkung sind weniger Drahtwindungen vorhanden als in dem Falle, wo die Elektromagnete für Gleichströme von konstanter Spannung bestimmt sind. Wechselstrom-Elektromagnete stossen Kupferplatten ab infolge der Wirbelströme, welche sie in ihnen erzeugen; wobei die Phase dieser Wirbelströme durch ihre Selbstinduktion verzögert wird. Elihu Thomson, der diese Abstossung untersuchte, konstruierte mehrere auf diesem Prinzipe beruhende Motoren. Wird ein Solenoid mit lamellenförmigem Eisenkern durch Wechselströme bei konstanten Volts gespeist, so zieht dasselbe den Eisenkern mit bedeutend stärkerer Kraft an, wenn derselbe noch vorragt, als wenn er sich in der Höhlung befindet. Dies ist ebenfalls eine Folge der hemmenden Wirkung.

XLIV. VORLESUNG: *Wechselstrom-Generatoren.*

473. Wechselstrommaschinen. Die einfache Wechselstrommaschine (Fig. 237) mit ihren beiden Gleitringen, welche zur Abnahme des Stromes dienen, ist ein blosses Modell. In der Praxis sind Maschinen erforderlich, welche ihren Strom bei einer Spannung von 1000 bis 5000 Volt abgeben, mit einer Frequenz von 50 bis 120 Cyklen pro Stunde. Niedrigere Frequenzen sind für Beleuchtungszwecke nicht geeignet, obschon sie zur Kraftübertragung zu verwenden sind. Hohe Volts sind bei Wechselströmen deshalb gebräuchlich, weil bei Anwendung von Transformatoren an Kupferdraht gespart wird (Art. 442). Unter diesen Bedingungen werden fast alle Wechselstrommaschinen als Multipolarmaschinen konstruiert; und da eine vollkommene Isolation, welche in den Armaturen erforderlich ist, eher erzielt wird, wenn diese Teile sich nicht bewegen, so ist es üblich, dieselben unbeweglich aufzustellen und dafür den Feldmagnet rotieren zu lassen. Letzterer wird besonders erregt durch einen kleinen Gleichstrom, welcher ihm durch Gleitringe zugeführt wird. Ein Vorzug der Wechselstrommaschinen vor den Gleichstrommaschinen ist der Mangel eines Kommutators.

Von den verschiedenen Systemen der Wechselstrommaschinen wollen wir folgende erwähnen: 1) Innerhalb rotierender Magnet, bestehend aus einer Reihe von alternierenden *N*- und *S*-Polen, welche radial nach aussen gerichtet sind; die Armatur ausserhalb, fest, bestehend aus einer Anzahl von Spulen, die entweder auf einen eisernen Ring gewickelt sind, (Gramme), oder auf nach innen vorragende Eisenpole (Ganz), oder an der inneren Seite eines Eisenkerns angebracht sind (Elwell-Parker), oder in Vertiefungen liegen, gerade einem Eisenkern gegenüber (Brown). Wird ein Eisenkern bei der Armatur benutzt, so ist derselbe jedesmal sorgfältig lamelliert. 2) Ausserhalb feststehender Magnet, bestehend aus einer Anzahl alternierender Pole, die radial nach innen zeigen; Armatur innerhalb und rotierend,

bestehend aus einer Anzahl von Spulen, welche entweder um einen cylindrischen Eisenkern gewickelt werden (Westinghouse, Thomson-Houston), oder auf radial vorstehenden Polen befestigt sind (Hopkinson). 3) Ausserhalb feststehender Magnet, bestehend aus zwei Kränzen von alternierenden *N*- und *S*-Polen, welch letztere einander dicht gegenüberstehen und auf diese Weise zwischen sich eine Anzahl magnetischer Felder erzeugen; die Armatur hat keinen Eisenkern, besteht aus einer Anzahl flacher Spulen, die zu einer Art sternförmiger Scheibe gewickelt sind, und rotiert innerhalb der zwischen den Polen befindlichen schmalen Oeffnungen (Siemens, Ferranti).

Eine andere vielfach in England gebräuchliche Form einer Wechselstrommaschine ist die von Mordey (Fig. 253). Die dünnen Spulen der Armatur sind fest und liegen innerhalb eines

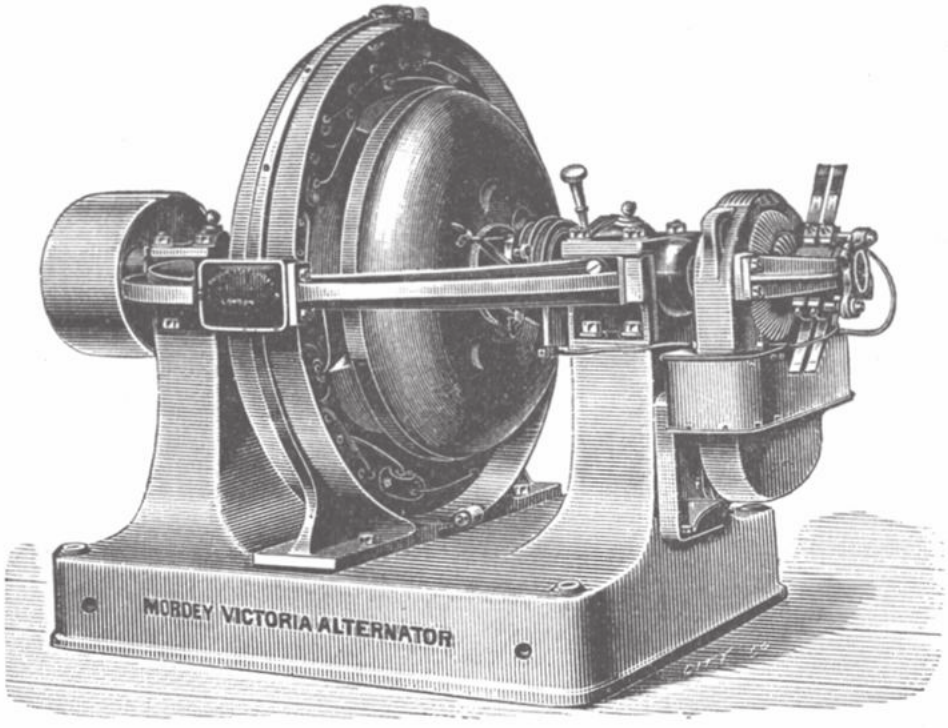


Fig. 253.

unbeweglichen Ringes, zwischen zwei Kränzen von Polen, welche auf beiden Seiten der Spulen rotieren. Die Magnete haben jedoch ihre *N*-Pole auf derselben Seite und ihre *S*-Pole auf der andern Seite; sie sind die Verlängerungen von zwei massiven Eisenpolstücken, welche an der Achse einer grossen innern Spule befestigt sind und auf diese Weise einen einfachen Feld-

magnet ausmachen. Am Ende der Achse befindet sich als Erreger eine kleine Gleichstrommaschine.

474. Verbindung von Wechselstrommaschinen. Beim Gebrauche mehrerer Wechselstrommaschinen für denselben Stromkreis haben wir einen Umstand zu beachten, welcher bei Gleichstrommaschinen nicht in Betracht kommt, da er eine Folge der Phasendifferenz der Ströme ist. Werden 2 Wechselstrommaschinen durch besondere Dampfmaschinen getrieben und laufen sie mit derselben Geschwindigkeit und bei gleicher Anzahl der Volts, so dürfen wir doch ihre Stromkreise nicht direkt mit dem Hauptstrange verbinden, falls sie nicht auch dieselbe Phase haben; denn andernfalls würde eine ernstliche Störung eintreten. Bei Zentralstationen ist es üblich, die einzelnen Maschinen alle neben einander laufen zu lassen. Wenn nun zwei Maschinen denselben Hauptstrang speisen, so ist jede bestrebt, der andern Strom zurück zu schicken; und wenn ihre elektromotorischen Kräfte stets ungleich sind, so sendet die Maschine mit der grössern E.M.K. ihren Strom in entgegengesetzter Richtung durch die andere. Diesen Vorgang erklärt Fig. 254, welche ein rotierendes Diagramm darstellt, ähnlich wie die Fig. 245 und 248. Befinden sich zwei Wechselstrommaschinen genau im gleichen Schritt, so werden beide in demselben Augenblicke nach der Hauptleitung einen Stromimpuls schicken, doch sind diese Impulse, soweit der sie verbindende Stromkreis in Betracht kommt, genau entgegengesetzt. Diese beiden entgegengesetzten Impulse seien *OA* und *OB*. Nehmen wir nun an, dass die eine der beiden Maschinen einen kleinen Vorsprung vor der andern gewinnt, so dass *OA* in die Lage von *OA'* kommt, so halten sich die beiden elektromotorischen Kräfte nicht mehr das Gleichgewicht, sondern haben eine Resultierende *OE*, welche bestrebt ist, einen Strom durch die beiden Maschinen zu schicken, indem dieser Strom eine andere

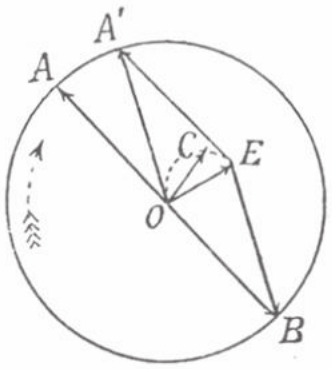


Fig. 254.

Phase hat wie die voreilende Maschine *A*, als auch wie die zurückbleibende Maschine *B*. Dieser lokale Strom wird jedoch selbst wieder ein wenig in Phase hinter *OE* zurückbleiben, infolge der Selbstinduktion längs seiner Bahn. Die Phase des Stromes möge dann durch die Linie *OC* dargestellt werden, welche etwas zurückbleibt. Wir haben einen zwischen den beiden Maschinen hin und her gehenden Strom und derselbe ist offenbar der Phase nach näher an *OA* als an *OB*. Hieraus folgt, dass bei der voreilenden Maschine *A* die Volt und Ampère mit einander der Phase nach näher zusammen sind, als bei der zurückbleibenden Maschine *B*. Beachten wir die Art. 431 und 440, so ergiebt sich sofort, dass der Strom die Maschine *B* als Motor treiben hilft, und dass eine grössere mechanische Anstrengung von der Maschine *A* verlangt wird, welche mehr als Generator wirkt. Folglich hat dieser Stromaustausch zur Folge, dass die zurückbleibende Maschine unterstützt und die voreilende Maschine belastet wird; sie werden wieder dieselbe Phase annehmen. Alle gut konstruierten Wechselstrommaschinen laufen, falls sie in geeigneter Weise getrieben werden, parallel zusammen, obgleich ihre elektromotorischen Kräfte ungleich sind. Wenn andererseits zwei Wechselstrommaschinen hinter einander verbunden sind, so hat der resultierende Strom das Bestreben, bei der geringsten Phasendifferenz die zurückbleibende Maschine zu belasten und die voreilende zu beschleunigen, bis ihre Phasen gerade entgegengesetzt sind, so dass die eine ganz als Generator, die andere ganz als Motor läuft. Dies ist von grosser Wichtigkeit bei Kraftübertragung von einer Wechselstrommaschine an dem einen Ende einer Linie nach einer gleichzeitig laufenden Wechselstrommaschine am andern Ende; beide Maschinen halten bei jeder Belastung gleichen Schritt. Doch laufen sie hinter einander nicht zusammen, wenn beide als Generatoren wirken sollen, falls dieselben nicht fest mit derselben Spindel verbunden sind.

Zur Vermeidung von Unfällen, welche bei einer zu plötzlichen Stromübertragung zwischen zwei Maschinen eintreten, be-

dient man sich in Beleuchtungsanlagen gewöhnlich eines Apparates, welcher die Phasen der Wechsel anzeigt. Soll eine Wechselstrommaschine in einen Stromkreis eingeschaltet werden (parallel mit einer oder mehreren andern), so schaltet der Beamte nicht eher ein, als bis die E.M.K. der Maschine genau dieselbe Phase hat wie die des Stromkreises, in welchen sie eingeschaltet werden soll.

XLV. VORLESUNG: *Transformatoren.*

475. Wechselstrom-Transformatoren. Bei der Verteilung der Ströme in die Ferne sind Transformatoren erforderlich, denn Glühlampen bedürfen einer geringen Spannung von 50 bis 100 Volt, während die Generatoren, um Kupfer in den Hauptleitungen zu sparen, mit hoher Spannung von 1000 bis 5000 Volt arbeiten müssen. Das Prinzip der Transformation haben wir in Art. 223 kurz erwähnt. Wechselstrom-Transformatoren sind Induktionsspulen mit lamellenartigen Eisenkernen, die gewöhnlich aus dünnen, weichen Eisenstreifen bestehen, welche derartig geformt sind, dass sie einen geschlossenen magnetischen Kreis bilden. Diese Eisenbänder sind von der primären Spule umgeben, welche den Wechselstrom aufnimmt und von einer sekundären Spule, welche den transformierten Wechselstrom abgiebt. Gewöhnlich besteht die primäre Spule aus zahlreichen Windungen dünnen, sehr sorgfältig isolierten Kupferdrahtes, welcher einen schwachen Strom bei hoher Spannung aufnimmt, und die sekundäre Spule aus wenigen Windungen dicken Kupferdrahtes (oder Kupferband), welcher einen bedeutend stärkern Strom bei niedriger Spannung abgiebt.

Um von 2000 Volt bis 100 Volt abwärts zu transformieren, ist das Verhältnis der Windungen wie 20 : 1. Welches auch das Verhältnis der Volt sein möge, die Ströme haben zu einander das umgekehrte Verhältnis, da abgesehen von den unvermeidlichen kleinen Verlusten bei der Transformation die aufgenommene Energie gleich der abgegebenen ist. Ein Trans-

formator habe das Verhältnis 20 : 1 in seinen Windungen, so müssen wir, um 100 Ampère bei 50 Volt aus der sekundären Leitung zu bekommen, in die primäre Leitung wenigstens 5 Ampère bei 1000 Volt hineinschicken.

In zerstreut liegenden Bezirken hat man für jedes Haus einen kleinen Transformator, wobei die Lampen in den Stromkreis mit niedriger Spannung eingeschaltet werden. In grossen Städten stellt man grosse Transformatoren auf Nebenstationen auf, von denen die Leitungen mit niedriger Spannung ausgehen, welche den Strom in die einzelnen Häuser schicken. Fig. 255 veranschaulicht den Gebrauch der Transformatoren bei einem Verteilungssystem.

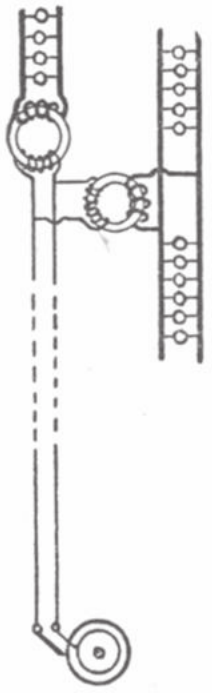


Fig. 255.

476. Elementare Theorie der Transformatoren. Werden die Volt in der primären Leitung konstant erhalten, so sind auch die Volt der sekundären Leitung nahezu konstant, und der Apparat reguliert sich selbst, indem von selbst mehr Strom in die primäre Leitung fliesst, je mehr Lampen in die sekundäre Leitung eingeschaltet werden. Dies ist eine Folge der hemmenden Wirkung der Selbstinduktion in der primären Leitung. Sind keine Lampen in den sekundären Stromkreis eingeschaltet, so wirkt die primäre Spule einfach als Hemmspule. Werden die Lampen eingeschaltet, so wirkt die primäre Spule als Arbeitsspule und induziert Ströme in der sekundären. Ist nur die Hälfte der Lampen eingeschaltet, so wirkt die primäre Spule teils als Hemmspule, teils als Arbeitsspule.

Sei V_1 die Anzahl der Volt an den Polen der primären Leitung, und V_2 diejenige an den Polen der sekundären; ferner sei S_1 die Anzahl der Windungen der primären Spule und S_2 diejenige der sekundären; r_1 sei der innere Widerstand der primären, r_2 derjenige der sekundären. Das Verhältnis der Transformation sei $k = S_1 : S_2$. Die Wechsel des Magnetismus im Eisenkerne erzeugen in den beiden Spulen elektromotorische

Kräfte E_1 und E_2, welche der resp. Anzahl ihrer Windungen genau proportional sind (wenn keine magnetische Streuung stattfindet). Folglich $E_2 = E_1 : k$; und da, abgesehen von kleinen Verlusten der Hysterie, $E_1 C_1 = E_2 C_2$ ist, so folgt, dass $C_1 = C_2 : k$. Die in der primären Leitung verlorenen Volt sind $r_1 C_1$, die in der sekundären $r_2 C_2$. Folglich ist:

$$V_1 = E_1 + r_1 C_1$$
$$V_2 = E_2 - r_2 C_2.$$

Aus der ersten Gleichung ergiebt sich: $E_1 = V_1 - r_1 C_1 = V_1 - r_1 C_2 : k$, und wenn wir $E_1 : k$ für E_2 setzen, so folgt aus der zweiten Gleichung:

$$V_2 = \frac{V_1}{k} - \left(\frac{r_1}{k^2} + r_2\right) C_2.$$

Hieraus ersehen wir, dass der ganze Vorgang in der sekundären Leitung derart ist, als ob die primäre Spule entfernt, V_1 durch einen den Windungen proportionalen Bruchteil ersetzt und gleichzeitig dem innern Widerstande eine Grösse hinzugefügt worden wäre, die gleich dem innern Widerstande der primären Leitung ist, dividiert durch das Quadrat des Verhältnisses der Windungen. Wir sehen auch, dass die Volt der sekundären Leitung dadurch konstant erhalten werden, dass der primäre Generator so reguliert wird, dass die Volt der primären Leitung etwas zunehmen, wenn viel Strom gebraucht wird. Die Ströme der beiden Spulen sind fast genau in entgegengesetzter Phase; sie erreichen zu gleicher Zeit ihre Maximalwerte, und fliessen in entgegengesetzter Richtung um den Eisenkern. Die Wirksamkeit gut konstruierter Transformatoren ist sehr gross, da die innern Verluste einen sehr geringen Prozentsatz der Arbeit ausmachen.

477. Gleichstrom-Transformatoren (Motor-Dynamomaschinen). Um Gleichströme zu transformieren, ist die Anwendung eines rotierenden Apparates erforderlich, der in Wirklichkeit eine Kombination eines Motors und eines Generators ist. Wenn z. B. ein Motor einen Strom von 10 Ampère bei 1000 Volt aufnimmt, so lässt sich mit demselben eine Dynamo betreiben, welche nahezu 200 Ampère bei 50 Volt abgiebt.

Statt zwei besondere Maschinen zu gebrauchen, kann man auch eine einzige Armatur mit 2 Wickelungen und 2 Kommutatoren versehen; die Anzahl der Windungen ist der Anzahl der Volt und ihre Querschnitte sind den Ampère proportional. Solche Motor-Dynamomaschinen finden in der Praxis Anwendung. Die elementare Theorie derselben stimmt mit der des vorigen Artikels überein; E_1 und E_2 bedeuten dann die elektromotorischen Kräfte, welche in den beiden Wickelungen der rotierenden Armatur induziert werden.

478. Gleichstrom-Wechselstrom-Transformatoren. Eine rotierende Vorrichtung, welche aus einer Kombination einer Gleichstrom- und einer Wechselstrommaschine besteht, lässt sich zur Transformation von Gleichströmen in Wechselströme oder umgekehrt benutzen; der eine Teil wirkt als Motor, der andere als Generator. Auch in diesem Falle sind nicht immer zwei besondere Maschinen erforderlich. Fig. 256 stellt eine einfache rotierende Armatur dar, welche sowohl mit einem Spaltröhren-Kommutator versehen ist, der die Gleichströme sammelt, als auch mit ein paar Gleitringen für Wechselströme. Solche Maschine vermag Gleichströme in Wechselströme umzuwandeln, und umgekehrt. Auch kann dieselbe als Motor dienen, wenn sie mit beiden Arten von Strömen gespeist wird, oder kann, mechanisch betrieben, beide Arten Ströme gleichzeitig erzeugen.

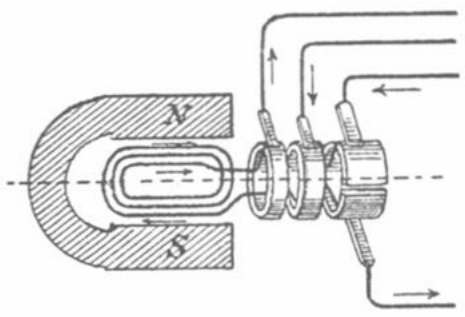


Fig. 256.

XLVI. VORLESUNG: *Wechselstrommotoren.*

479. Wechselstrommotoren. Wir haben in Art. 474 gesehen, dass eine Wechselstrommaschine eine andere als Motor treiben kann, wenn beide Maschinen mit gleicher Phase arbeiten. Solche Motoren haben zwei Mängel: 1) Sie setzen sich nicht von selbst in Bewegung, und müssen, ehe der Strom benutzt

ein rotierendes magnetisches Feld erzeugen, obgleich die Spule selbst still steht. Dies ist der bekannten Methode analog, wo sich aus zwei oscillatorischen Bewegungen eine rotierende, ohne jeden toten Punkt, bilden lässt, indem man zwei rechtwinklig zu einander stehende Kurbelstangen verwendet, um die Impulse in Intervallen von einer viertel Periode auf einander folgen lässt. Die obige Kombination heisst ein *Zwei-Phasen* Stromsystem. Ist der BB'-Strom $\frac{1}{4}$ Periode später als der AA'-Strom, so ist die Rotation in Fig. 258 von links nach rechts gerichtet.

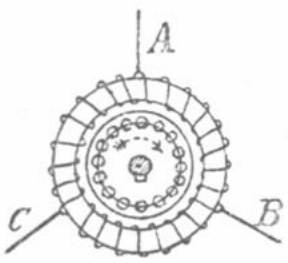


Fig. 258.

Eine andere Methode, ein rotierendes Feld zu erzeugen, ist das *Drei-Phasen* System [1]) (oder der sogenannte Drehstrom). Werden drei Wechselströme, die um $\frac{1}{3}$ Periode (oder 120) von einander differieren, in den Ring an den Stellen A, B und C eingeführt, so fliesst der Strom zuerst bei A ein (und bei B und C aus), darauf bei B (und bei C und A hinaus) und dann bei C (und bei A und B hinaus) und erzeugt, auf diese Weise ein rotierendes magnetisches Feld. Dies ist einer Dampfmaschine mit 3 Kurbelstangen analog, welche um 120° von einander abstehen.

Es giebt verschiedene Methoden, die Stromkreise zu verbinden, welche Ströme von ungleichen Phasen aufnehmen. Man kann z. B. die Wickelungen (Fig. 257) in vier getrennte Spulen zerlegen, von denen jede mit einer gemeinschaftlichen Verbindungsstelle zusammenhängt, während die 4 anderen Enden mit den resp. 4 Liniendrähten verbunden werden. Oder es lassen sich die Wickelungen (Fig. 258) als 3 getrennte Spulen anordnen, und in ähnlicher Weise wie vorher verbinden. Solche Anordnungen heissen *sternförmig*, zum Unterschiede von den *maschenförmigen* Gruppierungen. Auch ist es nicht notwendig, die Spulen über einen Ring zu wickeln. Die Zwei-Phasen-Spulen der Fig. 257 lassen sich auf vier nach innen vorspringende Pol-

---

1) Drei-Phasen Ströme wurden im Jahre 1891 bei der berühmten Kraftübertragung in Frankfurt benutzt. Vergl. Art. 442.

wird, in schnelle Rotation versetzt werden. 2) Ihre Feldmagnete müssen gesondert erregt werden. Man hat daher versucht, andere Formen von Motoren zu konstruieren. Gewöhnliche Gleichstommotoren, mit lamellenartigen Eisenmagneten, arbeiten mit Wechselströmen, obgleich nicht besonders gut.

Der moderne Wechselstrommotor ist nach den Vorschlägen von Borel (1887), Ferraris (1888) und Tesla (1888) konstruiert und benutzt zwei oder mehrere Wechselströme in verschiedenen Phasen.

480. Ströme mit verschiedenen Phasen. Wenn wir an der Armatur einer Wechselstrommaschine zwei getrennte Spulen anbringen, die eine etwas oberhalb der andern, so können wir offenbar 2 Wechselströme gleicher Frequenz und Stärke erhalten, die sich der Phase nach um jede beliebige Grösse unterscheiden. Gramme konstruierte in der That im Jahre 1878 Wechselstrommaschinen mit zwei und mit drei getrennten Stromkreisen. Werden zwei gleiche Wechselströme, die der Phase nach um eine viertel Periode differieren, in geeigneter Weise vereinigt, so lässt sich mittelst derselben ein *rotierendes magnetisches Feld* erzeugen. In einem solchen Felde lassen sich rotierende Konduktoren anbringen, wie Baily zuerst im Jahre 1879 vorschlug. Betrachten wir einen gewöhnlichen mit einer kontinuierlichen Wickelung versehenen Gramme'schen Ring (Fig. 257). Würde ein einzelner Wechselstrom an den Stellen AA' hineingeschickt, so würde ein oscillatorisches magnetisches Feld entstehen, mit einem N-Pole in A und einem S-Pole in A'. Diese Pole würden darauf verschwinden und in umgekehrter Reihenfolge wieder auftreten. Würde in gleicher Weise ein zweiter Wechselstrom bei BB' hineingeschickt, so würde derselbe ein anderes oscillatorisches Feld längs des Durchmessers BB' erzeugen. Lässt man beide Ströme arbeiten und zwar so, dass der BB'-Strom $\frac{1}{4}$ Periode hinter dem AA'-Strome zurück ist, so werden beide zusammen

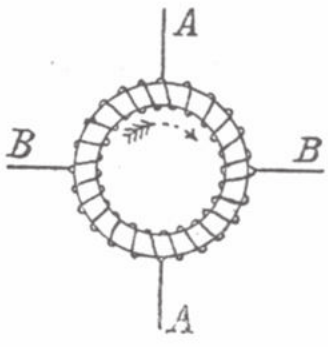


Fig. 257.

stücke wickeln, und ebenso die Drei-Phasen-Spulen der Fig. 258 auf drei nach innen vorragende Polstücke. Bei grössern mehrpoligen Maschinen könnte man eine Reihe von Drei-Phasen-Spulen auf 6, 9, 12 oder mehr Pole in regelmässiger Aufeinanderfolge wickeln.

481. Eigenschaften des rotierenden Feldes. In rotierenden magnetischen Feldern beginnen Metallmassen sofort zu rotieren. Ein im Schwerpunkte unterstützter Magnet (oder ein Eisenkern) kann eine gleichzeitige Bewegung anfangen, muss jedoch unter Umständen erst angestossen werden. Ein balancierter Körper aus gut leitendem Metall, wie z. B. Kupfer, wird sich ebenfalls in Bewegung setzen, auch von selbst, jedoch nicht gleichzeitig. Bei einer solchen im Zentrum unterstützten Metallmasse treten Wirbelströme auf (genau wie bei Arago's Rotationen, Art. 452), welche das Metall schleifen und zu drehen streben. Die Stärke dieser Ströme in dem rotierenden Teile hängt von der relativen Geschwindigkeit des Feldes und der Metallmasse ab. Würde sich letztere mit derselben Geschwindigkeit bewegen, wie das rotierende Feld, so würden die Wirbelströme aufhören und es würde keine treibende Kraft vorhanden sein. Das bei solchen Motoren benutzte Metall besteht aus einem cylinderförmigen Kern, der aus dünnen Eisenplatten zusammengesetzt ist, umgeben von einem Gehäuse von Kupferstäben, die mit ihren Enden in einen geschlossenen Stromkreis eingeschaltet sind. Der rotierende Teil hat weder Kommutator noch Gleitringe, und steht mit keinem andern Stromkreise in Verbindung. Er empfängt seine Ströme ausschliesslich durch Induktion. Solche Motoren beginnen die Bewegung mit beträchtlichem Drehungsmoment und besitzen bei voller Thätigkeit eine grosse Wirksamkeit. Aehnliche Motoren, für gewöhnliche oder Einfach-Phasen-Wechselströme sind heutzutage im Gebrauch. Um sie in Betrieb zu setzen, ist es notwendig, den Wechselstrom in zwei der Phase nach sich unterscheidende Ströme zu zerlegen. Dies geschieht mittelst eines geteilten Stromleiters, in dessen beide Zweige verschiedene Gegenwirkungen eingeschaltet werden.

Befindet sich in dem einen Zweige eine Hemmspule mit Selbstinduktion, so wird der Strom in diesem Zweige verzögert; befindet sich in dem andern ein Kondensator, so wird der Strom hier der Phase nach beschleunigt. Durch Kombination dieser beiden Ströme wird ein rotierendes Feld erzeugt, um die Bewegung einzuleiten. Wenn der Motor einmal seine Bewegung begonnen hat, so wird bei weiterer Drehung der Wechselstrom eintreten, und der Motor bewegt sich weiter, obgleich der Impuls jetzt nur oscillatorisch ist.

KAPITEL XI.

ELEKTRO-CHEMIE.

XLVII. VORLESUNG: *Elektrolyse.*

482. Elektromotorische Kraft der Polarisation. Nachdem wir die einfachen Gesetze über die chemische Wirkung des Stromes in der 19. Vorlesung festgestellt haben, müssen wir noch das Verhältnis zwischen der chemischen Energie und ihrem elektrischen Aequivalent betrachten. Jedesmal, wenn ein Elektrolyt von einem Strome zersetzt wird, haben die getrennten Jonen das Bestreben, sich wieder zu vereinigen; dieses Bestreben nennt man gewöhnlich »chemische Verwandtschaft«. Wird z. B. schwefelsaures Zinkoxyd ($ZnSO_4$) in Zn und SO_4 zerlegt, so hat das Zink das Bestreben, sich wieder in der Lösung aufzulösen und so die potentielle Energie des Systems auszudehnen. Löst sich aber Zink in Schwefelsäure auf, so ensteht dadurch eine E.M.K. von bestimmter Grösse; und um das Zink von der Schwefelsäure fern zu halten, ist eine E.M.K. erforderlich, die mindestens ebenso gross wie jene ist und die entgegengesetzte Richtung hat. Wird angesäuertes Wasser in einem Voltameter zersetzt, so haben wiederum die getrennten Wasserstoff- und Sauerstoffatome das Bestreben, sich wieder zu vereinigen und rufen eine entgegengesetzte E.M.K. von nicht weniger als 1,47 Volt hervor. Diese entgegengesetzte E.M.K., welche thatsächlich ein Maß ihrer chemischen Verwandtschaft ist, heisst die elektromotorische Kraft der Polarisation. Dieselbe lässt sich in jedem Wasser-

voltameter (Art. 238) beobachten, indem man einfach die Verbindung der Drähte mit der Batterie unterbricht und dieselben mit einem Galvanometer verbindet; man beobachtet alsdann einen Strom, welcher durch das Voltameter von der Wasserstoffelektrode nach der Sauerstoffelektrode zurückfliesst. Die Polarisation in einem Volta'schen Elemente (Art. 170) erzeugt in ganz analoger Weise eine entgegengesetzte E.M.K.

Da nun die Verwandtschaft des Wasserstoffes zum Sauerstoff durch eine E.M.K. von 1,47 Volt dargestellt wird, so ist klar, dass weder ein Element noch eine Batterie Wasser bei gewöhnlicher Temperatur zersetzen kann, wenn dieselben nicht eine E.M.K. von *mindestens* 1,47 Volt besitzen. Bei jedem Elektrolyt ist ein Minimum von E.M.K. erforderlich, um eine vollständige kontinuierliche Zersetzung zu erzeugen.

483. Theorie der Elektrolyse. Angenommen, ein Strom führe die Elektrizitätsmenge Q durch einen Stromleiter, in welchem eine entgegengesetzte elektromotorische Kraft E besteht; die Arbeit, welche verrichtet wird, wenn Q Elektrizitätseinheiten dieser E.M.K. entgegen bewegt werden, ist gleich $E \,.\, Q$. (Sind E und Q in absoluten C.G.S. Einheiten ausgedrückt, so bedeutet $E \,.\, Q$ Erg.) Die totale Energie des Stromes, welche zur Erzeugung von Wärme oder mechanischer Bewegung tauglich ist, wird um diese Grösse vermindert; letztere stellt die Arbeit dar, die gegen die in Frage kommende E.M.K. verrichtet wird.

Wir können aber noch in anderer Weise zu einem Ausdruck für dieselbe Arbeitsgrösse gelangen. Denn die Elektrizitätsmenge setzt bei ihrem Durchgange durch das Element eine bestimmte Menge von Metall ab; diese Metallmenge könnte verbrannt oder in Säure wieder aufgelöst werden, indem sie ihre potentielle Energie als Wärme von sich giebt, und da das mechanische Wärmeäquivalent bekannt ist, so kann die äquivalente Arbeitsmenge berechnet werden. Q Elektrizitätseinheiten bewirken die Ablagerung von $Q \,.\, z$ Gramm eines Jon, dessen absolutes elektrochemisches Aequivalent den Wert z hat. (Für Wasserstoff ist z. B. $z = 0{,}0001038$ Gramm, d. h. nach der Tabelle des

Art. 235 der 10fache Betrag, welcher von 1 Coulomb abgesetzt wird, denn das Coulomb ist der 10. Teil der absoluten C.G.S.-Einheit der Elektrizitätsmenge.) Bedeutet H die Anzahl der Wärmeeinheiten, welche 1 Gramm des Körpers entwickelt, wenn er die betreffende Verbindung eingeht, so giebt QzH den in Wärmeeinheiten ausgedrückten Wert der chemischen Arbeit an, welche durch das Fliessen der Q Einheiten verrichtet wird; und dieser Wert kann ohne weiteres in Arbeitseinheiten verwandelt werden, wenn wir mit dem Joule'schen Aequivalente $\mathcal{J}$ $(=42.10^6)$ multiplizieren. (Vergl. die Tabelle des folg. Art.)

Es ergiebt sich also folgende Gleichung:

$$E.Q = Q.z.H.\mathcal{J}, \text{ folglich } E = z.H.\mathcal{J},$$

d. h. in Worten: *Die elektromotorische Kraft eines chemischen Prozesses ist gleich dem Produkte des elektrochemischen Aequivalents des getrennten Jon und seiner in dynamischen Einheiten ausgedrückten Verbindungswärme.*

Beispiele. 1) Die E.M.K. des Wasserstoffs, welcher sich mit Sauerstoff zu verbinden strebt. Für Wasserstoff ist $z = 0{,}0001038$; H (Verbindungswärme eines Grammes) = 34000 Gramm-Grad-Einheiten; $\mathcal{J} = 42 . 10^6$.

$0{,}0001038 . 34000 . 42 . 10^6 = 1{,}48 . 10^8$ absolute Einheiten der E.M.K.

oder = 1,48 Volt.

2) Die E.M.K. des Zinks, welches sich in Schwefelsäure auflöst. $z = 0{,}00337$; $H = 1670$ (nach Julius Thomsen); $\mathcal{J} = 42 . 10^6$; $0{,}00337 . 1670 . 42 . 16^6 = 2{,}364 . 10^8$ oder 2,364 Volt.

3) Die E.M.K. des Kupfers, welches sich in Schwefelsäure auflöst. $z = 0{,}00327$, $H = 909{,}5$; $\mathcal{J} = 42 . 10^6$;

$0{,}00327 . 909{,}5 . 42 . 10^6 = 1{,}249 . 10^8$ oder = 1,249 Volt.

4) Die E.M.K. eines Daniell'schen Elementes. Hier wird an dem einen Pole Zink aufgelöst und es bildet sich schwefelsaures Zinkoxyd, so dass durch diesen chemischen Prozess eine + elektromotorische Kraft erzeugt wird; an dem andern Pole wird Kupfer durch den Strom aus einer Lösung von schwefelsaurem Kupferoxyd abgesetzt, und es entsteht dadurch eine entgegengesetzte (oder —) elektromotorische Kraft. Die des Zinks

beträgt, wie oben gezeigt wurde, + 2,364 Volt, die des ausgeschiedenen Kupfers — 1,249. Folglich ist die resultierende E.M.K. des Elements (bei Vernachlässigung der geringen elektromotorischen Kraft, welche an der Berührungsstelle der beiden Lösungen auftritt) 2,364 — 1,249 = 1,115 Volt. Dieser Wert stimmt annähernd mit dem in Art. 176 auf praktischem Wege gefundenen überein. Derselbe ist zur Elektrolyse des Wassers nicht ausreichend, dagegen vermögen 2 Daniell'sche Elemente, hinter einander geschaltet, das Wasser mit Leichtigkeit zu elektrolysieren.

Da eine Pferdekraft-Stunde = 746 Watt-Stunden = 746 Ampère-Stunden bei 1 Volt ist, so ist die Anzahl der Ampère-Stunden bei V Volt gleich $746 : V$. Da nun das Gewicht des in einem Elemente verbrauchten Zinks 1,213 g pro Ampère-Stunde beträgt (falls ohne Verlust gearbeitet wird), so ist der Verbrauch des Zinks pro Pferdekraft-Stunde gleich $\frac{746}{V} . 1{,}213$ g. Folglich darf die Zinkmasse, welche verbraucht wird, um in einer Batterie von Elementen eine Pferdekraft-Stunde zu erzeugen, nicht weniger als 746 . 1,213 g, dividiert durch die nützlichen Volt eines einzelnen Elements betragen.

Ein äquivalenter Betrag erregender und depolarisierender Chemikalien wird ebenfalls verbraucht, und hierdurch erhöhen sich die Gesamtunkosten. Es ist offenbar, dass Zink konsumierende Batterieen mit durch Dampf getriebenen Dynamomaschinen auf keinen Fall konkurrieren können, was den Preis anbetrifft. Der thatsächliche Kostenpunkt für Kohlen beträgt in den Londoner Zentralstationen 8 bis 13 Pfennig pro »Einheit«; und der gesetzliche Maximalpreis, den eine Gesellschaft in Grossbritannien für elektrische Energie zu beanspruchen hat, beträgt M. 0,68 pro »Einheit« (vergl. Art. 435).

484. Elektrochemische Kraft der Metalle. Die nachstehende Tabelle giebt die E.M.K. der verschiedenen Metalle an, wie dieselben nach der Methode des vorigen Art. aus ihren elektrochemischen Aequivalenten und aus der Wärme berechnet

worden ist, welche entwickelt wird, wenn sich eine solche Menge des Metalls mit Sauerstoff verbindet, welche elektrochemisch einem Gramm Wasserstoff äquivalent ist. Die Zahlen der zweiten Reihe geben die Kalorieen an. Die Zahlen der dritten Reihe sind aus denen der zweiten berechnet, durch Multiplikation mit dem elektrochemischen Aequivalent des Wasserstoffs sowie dem Joule'schen Aequivalent ($42 . 10^6$), und durch Division durch 10^8, um auf Volt zu reduzieren. Die elektromotorischen Kräfte (in Volt), welche in Bezug auf verdünnte Schwefelsäure beobachtet worden sind, sind des Vergleichs halber mit angeführt.

Körper.	Verbrennungswärme.	Berechnete E.M.K. bezogen auf Sauerstoff	Berechnete E.M.K. bezogen auf Zink	Beobachtete E.M.K.
Kalium	69,800	3,01	+ 1,18	+ 1,13
Natrium	67,800	2,91	+ 1,09	—
Zink	42,700	1,83	0	0
Eisen	34,120	1,55	— 0,28	—
Wasserstoff . . .	34,000	1,47	— 0,36	—
Blei	25,100	1,12	— 0,71	— 0,54
Kupfer	18,760	0,80	— 1,08	— 1,047
Silber	9,000	0,39	— 1,44	—
Platin	7,500	0,33	— 1,50	— 1,53
Kohle	2,000	0,09	— 1,74	—
Sauerstoff . . .	0	0	— 1,83	— 1,85
Salpetersäure . .	— 6,000	— 0,26	— 2,09	— 1,94
Braunstein . . .	— 6,500	— 0,29	— 2,12	— 2,23
Bleisuperoxyd . .	— 12,150	— 0,52	— 2,35	— 2,52
Ozon	— 14,800	— 0,63	— 2,46	— 2,64
Mangansäure . .	— 25,070	— 1,09	— 2,92	— 3,03

Die Aufeinanderfolge, in welcher diese Metalle aufgezählt sind, ist in der That nichts anderes, als die Reihenfolge der Oxydierbarkeit der Metalle (in der Umgebung von verdünnter Schwefelsäure); denn dasjenige Metall strebt am meisten zu

oxydieren, welches beim Oxydieren die grösste Energie entwickeln kann. Die Tabelle giebt auch die Reihenfolge, in welcher die Metalle einander zu ersetzen befähigt sind (in einer Lösung von Schwefelsäure). In dieser Reihe sind ferner die zuletzt stehenden Metalle diejenigen, welche von einem elektrischen Strome aus zwei oder mehreren derselben enthaltenden Lösungen zuerst ausgeschieden werden; denn dasjenige Metall wird zuerst ausgeschieden, welches den geringsten Aufwand an Energie erfordert, um von den Atomen getrennt zu werden, mit denen es verbunden war.

485. Allgemeine Gesetze über elektrolytische Vorgänge. Neben Faraday's quantitativen Gesetzen, welche in Art. 235 angegeben sind, sind noch folgende von Wichtigkeit:

a) Jeder Elektrolyt wird in zwei Teile zersetzt, in ein Anion und in ein Kation, welche selbst wieder einfach oder zusammengesetzt sein können. Für den Fall einfacher binärer Verbindungen, wie z. B. Kochsalz, NaCl sind die Jonen einfache Elemente. In andern Fällen werden die Produkte oft durch sekundäre Wirkungen kompliziert. Es ist sogar möglich, eine Legierung zweier Metalle — z. B. Messing — aus einem Gemenge von Zink- und Kupfer-Cyanit auszuscheiden.

b) Bei binären Verbindungen und den meisten metallischen Lösungen wird das Metall durch den Strom da abgesetzt, wo derselbe das Element verlässt, an der Kathode.

c) Wässrige Salzlösungen der Alkalien und alkalischen Erden setzen kein Metall ab, sondern entwickeln Wasserstoff infolge einer sekundären Wirkung des Metalls auf das Wasser. Aus *starken* Lösungen von Aetzkali und Soda vermochte Davy metallisches Kalium und Natrium herzustellen, welche vorher unbekannt waren. Werden Quecksilberelektroden angewendet, so erhält man ein Amalgam jener beiden Metalle an der Kathode. Das sogenannte Ammonium-Amalgam erhält man, wenn man eine warme, starke Lösung von Salmiak zwischen Quecksilberelektroden elektrolysiert.

d) Nach ihrem elektrolytischen Verhalten lassen sich die

Körper in eine solche Reihe bringen, dass jeder Körper der Tabelle sich als Kation (oder als »elektropositiv«) erweist, wenn er aus seiner Verbindung mit einem andern Körper, der in der Tabelle weiter unten steht, elektrolysiert wird. In einer solchen Reihe stehen die oxydierbaren Metalle, wie Kalium, Natrium, Zink etc. zuletzt; voran gehen die weniger oxydierbaren oder »elektronegativen« Metalle. Die Reihenfolge richtet sich nach der Natur, Stärke und Temperatur der benutzten Lösung.

e) Aus einer Lösung von mehreren metallischen Salzen scheidet das am wenigsten elektropositive nicht zuerst aus, falls der Strom in Bezug auf die Grösse der Kathode stark genug ist, um die Lösung in der Nachbarschaft derselben zu schwächen. Um Legierungen auszuscheiden, ist eine Lösung erforderlich, in welcher beide Metalle sich mit derselben E.M.K. auflösen.

f) Die frei gewordenen Jonen erscheinen nur an den Elektroden.

g) Für jeden Elektrolyt ist ein *Minimum an elektromotorischer Kraft* erforderlich, wenn eine vollständige Elektrolyse erreicht werden soll. (Vergl. Art. 486.)

h) Hat der Strom eine geringere elektromotorische Kraft als das erforderliche Minimum, so kann die Elektrolyse beginnen und anfangs ein schwacher Strom fliessen, aber es werden keine Jonen frei, indem der Strom vollständig gehemmt wird, sobald die entgegengesetzte elektromotorische Kraft der Polarisation gleich der des elektrolysierenden Stromes geworden ist.

i) Es tritt keine entgegengesetzte elektromotorische Kraft der Polarisation auf, wenn die Elektrolyse von einer Anode desselben Metalles bewerkstelligt wird, welches an der Kathode abgesetzt wird. Das schwächste Element genügt, um Kupfer aus Kupfervitriol auszuscheiden, wenn die Anode eine Kupferplatte ist.

j) Sind die Jonen Gase, so ist der Druck von Einfluss. Bei einem Drucke von 300 Atmosphären wird angesäuertes Wasser noch elektrolysiert, aber unter Umständen sammelt sich

an der Anode eine Säureschicht an, welche dicht genug ist, um nicht zu leiten, so dass der Strom unterbrochen wird.

k) Die chemische Arbeit, welche von einem Strome in einem elektrolytischen Becher verrichtet wird, ist dem Minimum der elektromotorischen Kraft der Polarisation proportional.

l) Obgleich die elektromotorische Kraft der Polarisation dieses Minimum überschreiten kann, so tritt doch die Arbeit, welche der Strom beim Ueberwinden dieses Ueberschusses an elektromotorischer Kraft verrichtet, nicht als chemische Arbeit auf, denn kein Jon wird mehr frei; dagegen erscheint die Arbeit als eine neu hinzutretende Wärmemenge (oder »lokale Wärme«), welche in dem elektrolytischen Becher entwickelt wird.

m) Das Ohm'sche Gesetz gilt für elektrolytische Leitung ebensogut wie für metallische Konduktoren.

n) Unter den sekundären Wirkungen, welche hierbei zu tage treten können, sind folgende die wichtigsten: — 1) Die Jonen können sich selbst zersetzen; wie SO_4 in $SO_3 + O$. 2) Die Jonen können auf die Elektroden eine Gegenwirkung ausüben; wird z. B. angesäuertes Wasser zwischen Zinkelektroden elektrolysiert, so wird kein Sauerstoff frei, infolge der Verwandtschaft des Zinks zum Sauerstoff. 3) Die Jonen können in einem anormalen Zustande frei werden. So wird z. B. Sauerstoff häufig in seinem aktiven Zustande als Ozon frei, besonders wenn übermangansaure Salze elektrolysiert werden. Der »naszierende« Wasserstoff, welcher bei der Elektrolyse von verdünnter Säure frei wird, hat besonders aktive chemische Eigenschaften. In gleicher Weise werden auch bisweilen die Metalle in anormalem Zustande ausgeschieden: Kupfer als schwarzer, staubiger Ueberzug; Antimon als rundliche, graue Körperchen (aus einer Lösung von Dreifach-Chlorür), welche eine eigentümliche Geneigtheit zum Explodieren haben. Wird eine Bleilösung elektrolysiert, so bildet sich eine Schicht Bleisuperoxyd *auf der Anode.* Besteht diese aus einer polierten Metallplatte, welche horizontal in die Flüssigkeit unterhalb eines als Kathode dienenden Platindrahtes gebracht wird, so findet die Ausscheidung in symmetrischen Ringen

von verschiedener Dicke statt, indem die stärkste Ausscheidung im Zentrum vor sich geht. Diese unter dem Namen Nobili'sche Ringe bekannten Ringe zeigen alle Farben des Regenbogens, eine Folge der Interferenz der in der Schicht zusammentreffenden Lichtwellen. Die Farben entsprechen in der That den Newton'schen Farbenringen dünner Platten, jedoch in umgekehrter Reihenfolge.

486. Die Hypothesen von Grotthuss und Clausius. Eine vollständige Theorie der Elektrolyse muss zweierlei erklären: 1) Die Bewegung der Elektrizität und 2) die Bewegung der Materie durch die Flüssigkeit des Bechers hindurch. Der letztere Punkt hat am meisten die Aufmerksamkeit auf sich gelenkt, da die »Wanderung der Jonen« (d. h. ihre Bewegung durch die Flüssigkeit) in zwei entgegengesetzten Richtungen und ihr Auftreten an den Elektroden allein auffallende Thatsachen sind.

Die von Grotthuss im Jahre 1805 aufgestellte Hypothese kann, wenn sie mit den neuern Ausdrücken in Einklang gebracht wird, diese Thatsachen ziemlich ausreichend erklären. Grotthuss nimmt an, dass, wenn zwei Metallplatten von ungleichem Potential in einen Becher gestellt werden, die erste in der Flüssigkeit erzeugte Wirkung die ist, dass die Moleküle der Flüssigkeit sich in unendlich vielen Ketten so anordnen, dass die das Molekül zusammensetzenden Atome nach einer bestimmten Richtung zeigen; indem das elektropositive Atom von der Kathode und das benachbarte elektronegative Atom von der Anode angezogen wird. (Dies setzt voraus, dass die das Molekül zusammensetzenden Atome ihre individuellen elektrischen Eigenschaften beibehalten.) Die Zeichnung in Fig. 259 zeigt für den Fall von Chlorwasserstoff eine Reihe von Molekülen 1, wo dieselben ganz unregelmässig liegen, und dann eine Reihe 2, wo dieselben so gruppiert sind, wie oben angegeben. Die nach der Annahme von Grotthuss stattfindende Wirkung besteht dann darin, dass längs der ganzen Reihe die einzelnen Atome sich von ihren zugehörigen Atomen lostrennen und sich mit andern verbinden, indem jedes Wasserstoffatom sich mit dem Chlor-

atom des benachbarten Moleküls vereinigt, und ein positives halbes Molekül Wasserstoff an der Kathode, ein negatives halbes Molekül Chlor an der Anode frei wird. Hierdurch würden

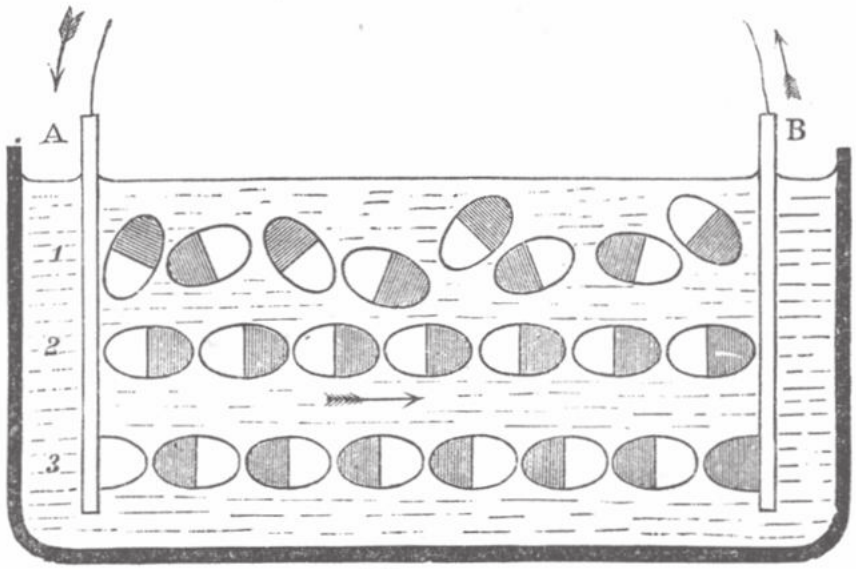


Fig. 259.

die Moleküle wie in der Reihe 3 gruppiert; und wenn sich der Vorgang wiederholte, so würde also eine doppelte Wanderung erfolgen, der Wasserstoffatome in der einen Richtung und der Chloratome in der andern, und zwar so, dass die frei gewordenen Atome nur an den Elektroden erschienen, und dass jedes auf diese Weise frei gewordene Atom eine bestimmte kleine elektrische Ladung an der Elektrode absetzte, wo es frei wurde [1]).

Clausius versuchte die Grotthuss'schen Ideen mit der neuern kinetischen Theorie über die Konstitution der Flüssigkeiten in Einklang zu setzen. Danach müssen mir annehmen, dass im gewöhnlichen Zustande einer Flüssigkeit die Moleküle sich in beständiger Bewegung befinden, indem sie an einander vorbei-

1) G. J. Stoney hat in neuerer Zeit aus der Grösse der Atome (wie dieselbe von Loschmidt und Kelvin bestimmt wurde) berechnet, dass für jede chemische Trennung eine Ladung von 10^{-20} Coulomb fortgeführt wird. (E. Budde behauptet $17 . 10^{-20}$ Coulomb). Diese Grösse würde also die natürliche Atom-Ladung oder Einheit sein. Um ein Atom Wasserstoff aus einer Wasserstoffverbindung auszuscheiden, muss diese Elektrizitätsmenge hindurchgeschickt werden. Ein Atom Zink, oder irgend ein anderes zweiwertiges Metall aus seiner Verbindung auszuscheiden, erfordert den Durchgang einer doppelten Elektrizitätsmenge.

gleiten, und dass die Atome der Moleküle ebenfalls in Bewegung sind, sich fortwährend von einander losreissen und sich zu ähnlichen Gruppen wieder vereinigen, wobei ihre Bewegungen in allen möglichen Richtungen durch die Flüssigkeit vor sich gehen. Unter dem Einflusse einer elektromotorischen Kraft wird jedoch die *Richtung* dieser Bewegungen beschränkt, so dass ein Atom, welches sich im Verlaufe der gewöhnlichen Bewegungen von einer Gruppe trennt, das Bestreben hat, sich nach der Kathode oder nach der Anode zu bewegen; und falls die in Betracht kommende elektromotorische Kraft stark genug ist, um eine Wiedervereinigung zu verhindern, so werden diese Atome dauernd getrennt und sammeln sich um die Elektroden herum an. Diese Theorie hat den Vorzug, dass sie die leicht zu beobachtende Thatsache erklärt, dass eine elektromotorische Kraft, welche kleiner als das zur vollständigen Elektrolyse erforderliche Minimum ist, durch einen Elektrolyten für eine begrenzte Zeit einen schwachen Strom senden kann, bis nämlich die entgegengesetzte elektromotorische Kraft einen ebenso grossen Wert erreicht hat. Helmholtz nannte diese Erscheinung der teilweisen Elektrolyse die *elektrolytische Konvektion;* er nimmt an, dass sie durch die nicht verbundenen Atome bewirkt wird, welche schon vorher in der Flüssigkeit waren.

XLVIII. VORLESUNG: *Akkumulatoren.*

487. Akkumulatoren und sekundäre Batterieen. Ein Voltameter oder eine Reihe von Voltametern, deren Elektroden mit Wasserstoff resp. Sauerstoff beladen sind, können als sekundäre Batterieen dienen, in denen die Energie eines Stromes aufgespeichert und wieder gewonnen werden kann. Ritter, welcher im Jahre 1803 eine sekundäre Batterie konstruierte, benutzte Platinelektroden. Wir werden sehen, dass solche Elemente keine Elektrizität aufspeichern; was sie ansammeln, ist Energie, welche sie in Form von chemischer Arbeit ansammeln. Ein sekundäres Element gleicht einer Leydener Flasche, in sofern, als es ge-

laden und entladen werden kann. Die Restladungen Leydener Flaschen gleichen genau den Polarisations-Ladungen der Voltameter, obgleich jene von geringer Grösse und bei ihrer Ausladung vorübergehend sind. Varley fand, dass 1 qcm Platinfolie in verdünnter Säure ebenso wirkt, wie ein Kondensator von circa 63 Mikrofarad Kapazität, falls auf eine Potential-Differenz von 1 Volt polarisiert wird. Gaston Planté konstruierte im Jahre 1860 ein sekundäres Element, welches aus zwei Bleiplatten besteht, die, ohne sich zu berühren, als Elektroden aufgerollt sind und in verdünnte Schwefelsäure tauchen (Fig. 260). Um das Blei zu präparieren, wird dasselbe wiederholt durch Ströme in alternierender Richtung geladen, bis sich die Anode mit einer halb porösen Schicht von braunem Bleisuperoxyd überzieht und die Kathode in einen schwammigen, metallischen Zustand übergeht und so eine grosse Oberfläche von hoher chemischer Wirksamkeit bietet. Wenn eine sekundäre Batterie oder ein Akkumulator geladen wird, indem man dieselbe mit einer Dynamo oder mit einem andern kräftigen Stromerzeuger verbindet, so speichert sich an der Anode der Sauerstoff auf, während die Kathode durch den frei gewordenen Wasserstoff desoxydiert. Die Platten können mehrere Tage hindurch in diesem Zustande verharren und liefern so lange einen Strom, bis die beiden Bleioberflächen auf einen chemisch inaktiven Zustand gebracht worden sind. Die E.M.K. solcher Elemente erreicht während der Entladung eine Stärke von 1,85 bis 2 Volt. Planté hat in sinnreicher Weise Batterieen solcher Elemente aufgestellt, so dass dieselben bei Parallel-Schaltung geladen und, hinter einander geschaltet, entladen werden können; sie geben dabei (für kurze Zeit) Ströme von ausserordentlicher Stärke. Im Jahre 1881

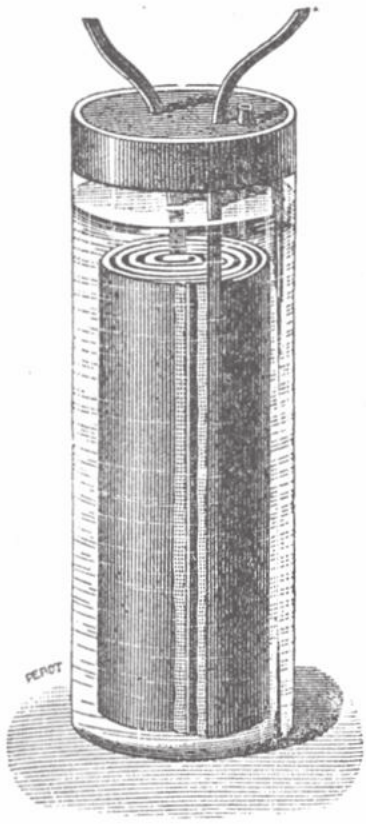


Fig. 260.

verbesserte Faure den Planté'schen Akkumulator, indem er die beiden Bleiplatten von vornherein mit einer Schicht Mennige bedeckte. Geht ein Strom durch das Element, um dasselbe zu laden, so wird die Mennige an der Anode mit Sauerstoff beladen und an der Kathode zuerst auf eine niedere Oxydationsstufe gebracht und dann in den schwammigen, metallischen Zustand übergeführt. Auf diese Weise wird für eine bedeutendere Dicke des arbeitenden Körpers gesorgt und dieser kann viel schneller angefertigt werden, als es bei den Planté'schen Elementen der Fall ist. Bei neueren Akkumulatoren wird die Mennige mit verdünnter Schwefelsäure zu einem Teig verarbeitet und in die Löcher eines bleiernen Rostes gepresst, welcher so geformt ist, dass eine gute mechanische Befestigung möglich ist. Während des nun folgenden Prozesses der »Formierung« wird der erhärtete Teig auf der einen Platte reduziert und auf der andern oxydiert. Fig. 261 zeigt eine unter dem Namen E.P.S.-Element bekannte Batterie. Noch jetzt werden nach der Planté'schen Methode Akkumulatoren aus metallischem Blei angefertigt, welches zunächst auf mechanischem oder chemischem Wege an der Oberfläche fein zerteilt und dann durch fortgesetztes Laden »formiert« wird. Elemente dieser Art sind nicht wie Teig-Elemente einer Zersetzung unterworfen und können schneller entladen werden. Um Akkumulatoren in gutem Zustande zu erhalten, muss man dieselben täglich vollständig laden (bis Blasen aufsteigen) und darf sie nicht zu schnell entladen. Die Verdünnung der Säure sollte 1,15 bis 1,21 betragen.

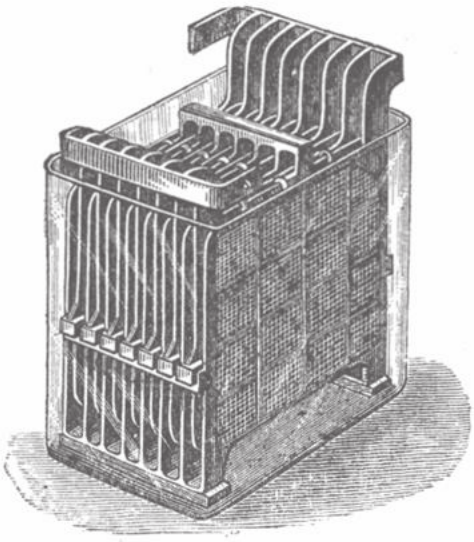


Fig. 261.

488. Die Grove'sche Gasbatterie. W. Grove konstruierte ein Element, bei welchem die gewöhnlichen Zink- und Kupferplatten durch Platinelektroden ersetzt sind, welche mit Wasserstoff-, resp. Sauerstoffgas in Berührung stehen. Jedes

dieser Gase wird an dem Platin zum Teil festgehalten, und dieses verhält sich dann wie zwei verschiedene Metalle.

Man hat versucht, mit Hilfe von Gasbatterieen Elektrizität im grössern Maßstabe zu erzeugen. Mond und Langer fanden, dass die grösste E.M.K., welche ein Wasserstoff-Sauerstoff-Element mit fein zerteiltem Platin als Kollektor liefert, nur 0,97 beträgt, da die Differenz zwischen diesem Werte und dem theoretischen 1,47 durch Wärmeentwicklung verloren geht, welche eine Folge der Kondensation der Gase durch das Platin ist.

XLIX. VORLESUNG: *Galvanoplastik.*

489. Elektrometallurgie. Die Anwendungen der Elektrochemie auf die Gewerbe sind dreierlei Art: 1) Gewinnung der Metalle aus Lösungen ihrer Erze; ein Prozess, welcher von grossem Nutzen bei der genauen Münzprobe gewisser Erze ist, wie z. B. des Kupfers. 2) Vervielfältigung von Bildern, Gipsfiguren und Metallsachen durch Ablagerung des Metalls an der Kathode. 3) Ueberziehen von Gegenständen aus ordinärem Metall mit einer dünnen Schicht eines andern Metalls, wie Gold, Silber oder Nickel. Alle diese Anwendungen fasst man unter dem allgemeinen Namen *Elektrometallurgie* zusammen.

Es steht noch nicht fest, ob die Gewinnung des Aluminiums in dem elektrischen Schmelzofen teilweise elektrolytischer Natur ist, oder ob es ein rein chemischer Prozess ist. Aluminiumoxyd wird mit Holzkohle vermischt und zwischen die Enden zweier dicken Kohlestäbe in einem geschlossenen feuerfesten Schmelzofen gebracht, der mit Holzkohle bekleidet ist. Ein Strom von mehreren 1000 Ampère wird durch die Kohlestäbe geschickt, das Aluminiumerz schmilzt und das Metall sondert sich vom Sauerstoff. Das frei gewordene Aluminium lässt man gewöhnlich eine Legierung mit einem andern Metall, wie z. B. Kupfer, eingehen, welches vorher der Masse zugefügt wurde. Man erhält dann die berühmte Aluminium-Bronze. Reines Alu-

minium wird jetzt in grössern Mengen durch die Elektrolyse von geschmolzenem Kryolit gewonnen, einer Verbindung von Fluor, Aluminium und Natrium.

Ganz reines Kupfer erhält man in grössern Mengen, wenn man Anoden aus unreinem Kupfer in eine Lösung von schwefelsaurem Kupferoxyd bringt, wobei sich auf elektrolytischem Wege reines Kupfer an den Kathoden absetzt. Da die Unreinheiten, wie z. B. Arsenik, stärker elektronegativ sind, als Kupfer, so bleiben dieselben in dem Bade zurück.

490. Elektrotypographie. Im Jahre 1836 machte De la Rue die Beobachtung, dass das Kupfer, welches aus der Lösung ausgeschieden und auf der als Pol dienenden Kupferplatte abgesetzt wird, ein genauer Abdruck der Platte ist, bis auf die Schrammen derselben. Im Jahre 1839 gaben Jacobi in St. Petersburg, Spencer in Liverpool und Jordan in London, gestützt auf diese Thatsache und unabhängig von einander, eine Methode an, wie man vermittelst der Elektrolyse des Kupfers Abdrücke (im umgekehrten Relief) von Münzen, Stereotypplatten und Schmuckgegenständen erhalten kann. Eine weitere von Murray herrührende Verbesserung war der Gebrauch von Gips- oder Wachsformen, welche mit einer Graphitschicht überzogen sind, um eine leitende Oberfläche herzustellen, auf welcher der Niederschlag vor sich gehen kann. Jacobi nannte diesen Prozess *Galvanoplastik*, ein Ausdruck, den man jetzt allgemein durch den Ausdruck **Elektrotypographie** ersetzt hat.

Elektrotypen des Kupfers lassen sich leicht anfertigen, indem man eine geeignete Form in einem Becher aufstellt, welcher eine gesättigte Lösung von Kupfervitriol enthält und dann einen Strom einer Batterie durch das Element schickt; die Form bildet die Kathode und eine Kupferplatte die Anode, welche sich allmählich in der Flüssigkeit auflöst und zwar in genau demselben Verhältnis, wie die Ablagerung an der Kathode stattfindet. Dieser Gebrauch einer besonderen Batterie ist bequemer, als wenn man die Elektrotypen in einem Elemente einer Daniell'schen Batterie hervorbringt. Diese Methode kommt heutzutage

vielfach in Anwendung, um getriebene Ornamente und andere Kunstwerke nachzubilden und Holzschnitte zu vervielfältigen. Fast alle Illustrationen dieses Buches z. B. sind von Elektrotypen abgedruckt und nicht von den ursprünglichen Holzblöcken, welche nicht lange genug vorhalten würden.

Bei allen galvanoplastischen Versuchen hängt der Erfolg wesentlich von der geeigneten Stromdichte ab. Um Metalle niederzuschlagen, welche stärker positiv als Wasserstoff sind, wie z. B. Zink oder Chrom, thut man gut, konzentrierte Lösungen und hohe Stromdichten zu verwenden. Bei Metallen, welche nicht sehr stark positiv sind, wie z. B. Kupfer und Silber, ist eine geringere Stromdichte geeignet. Um einen guten festen Kupferüberzug zu erhalten, ist ein Strom von höchstens 15 Ampère pro Quadratfuss der Kathodeoberfläche zu empfehlen. Wird ein schnellerer Niederschlag verlangt, so verwende man eine Lösung von salpetersaurem Kupfer, welche man in lebhafter Wallung erhalte.

Um Eisen niederzuschlagen, wird eine sehr grosse Eisenplatte als Anode, sowie eine Salmiaklösung benutzt. Dieser Lösung wird auf die Weise Eisen zugeführt, dass man den Strom eine Zeit lang durch das Bad hindurchschickt, bevor man den mit einer Stahlschicht zu überziehenden Gegenstand hineinbringt.

491. Galvanische Vergoldung und Versilberung. Im Jahre 1801 machte Wollaston die Beobachtung, dass ein Stück Silber, welches mit einem stärker positiven Metall verbunden wird, sich mit einer Kupferschicht überzieht, wenn man dasselbe in eine Kupferlösung stellt; und im Jahre 1805 vergoldete Brugnatelli zwei silberne Medaillen, indem er sie als Kathoden eines mit einer Goldlösung gefüllten elektrolytischen Bechers nahm. Darauf führte Elkington die galvanische Vergoldung und Versilberung um das Jahr 1840 in das Gewerbe ein. Bei diesen Prozessen wird ein schlechteres Metall, wie z. B. Argentan (eine Legierung von Zink, Kupfer und Nickel) mit einer dünnen Schicht von Gold oder Silber überzogen, indem man im erstern Falle eine Lösung von Cyangold und Kalium, im zweiten Falle eine solche von Cyansilber und Kalium verwendet.

Fig. 262 zeigt eine Batterie und ein Versilberungsgefäss, welches die Silberlösung enthält. An der Anode befindet sich eine Platte metallischen Silbers, welches sich in der Flüssigkeit

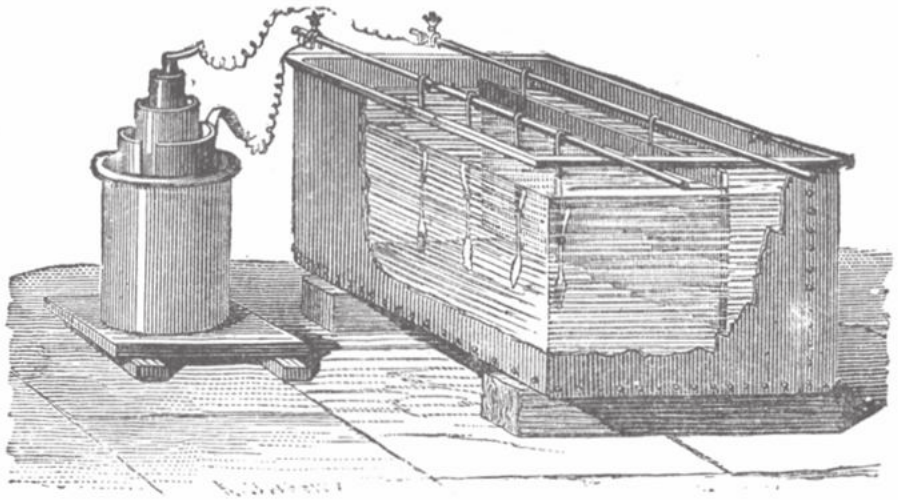


Fig. 262.

auflöst. An der Kathode sind Löffel, Gabeln oder andere Gegenstände aufgehängt, welche mit einem Silberüberzuge versehen werden sollen. Wird der Lösung etwas Schwefelkohlenstoff zugesetzt, so nimmt das sich niederschlagende Metall eine glänzende Oberfläche an. Ist der Strom zu stark und der Niederschlag infolge dessen zu schnell, so wird das abgesetzte Metall graulich und krystallinisch.

Beim Versilbern oder Vergolden eiserner Gegenstände überzieht man dieselben gewöhnlich erst mit einer dünnen Kupferschicht. Beim Vergolden unedler Metalle, wie z. B. des Zinns, werden dieselben ebenfalls erst mit Kupfer belegt. Das Vergolden der Innenseite von Krügen und Tassen geschieht in der Weise, dass dieselben mit der Goldlösung angefüllt werden und dann eine Anode von Gold hineingehängt wird, während das Gefäss selbst mit dem — Pole der Batterie verbunden wird.

Beim Versilbern oder Vergolden eiserner Gegenstände überzieht man dieselben zunächst gewöhnlich mit einer dünnen Kupferschicht mit Hilfe eines alkalischen Kupferbades, welches eine ammoniakalische Lösung von Cyankupfer enthält. Auch Messing wird aus einer Ammoniaklösung von Cyankupfer und Cyanzink niedergeschlagen. Zum Niederschlagen des Nickels

verwendet man eine Lösung von Nickel- und Ammoniumsulphat; die dazu gehörige Anode ist eine gewalzte Nickelplatte.

An Stelle einer Batterie kommen in neuerer Zeit häufig dynamoelektrische Generatoren zur Anwendung.

491 a. Weitere elektrolytische Prozesse. Die elektrolytische Wirkung des Stromes benutzt man heutzutage in den Gewerben auch noch zu andern Zwecken, als zu metallischen Niederschlägen. Durch Elektrolyse des Kaliumchlorür gewinnt man in grossem Maßstabe chlorsaures Kali, ebenso Chlorwasser aus Chlorverbindungen. Aeztnatron stellt man durch Elektrolyse aus gewöhnlichem Salz her. Auch hat man verschiedene elektrolytische Methoden zur Desinfektion des Gossenwassers in Vorschlag gebracht. Es ist ferner nachgewiesen, dass sich die langsamen Prozesse in der Gerberei mit Hilfe elektrischer Ströme beschleunigen lassen, wobei die Wirkung mehr osmotischer als elektrolytischer Natur zu sein scheint.

Wahrscheinlich wird die Anwendung elektrischer Ströme in der chemischen Technik in Zukunft noch eine grosse Rolle spielen.

KAPITEL XII.

TELEGRAPHIE.

L. VORLESUNG: *Elektrische Telegraphen.*

492. Der elektrische Telegraph. Es ist schwer zu sagen, wer der eigentliche Erfinder des Telegraphs gewesen ist. Lesage (Genf 1774), Lomond (Paris 1787) und F. Ronalds (London 1816) erfanden Systeme, mittelst deren man Signale durch Drähte hindurchschicken konnte, indem man an dem einen Ende die Divergenz zweier Markkugeln beobachtete, wenn in das andere Ende eine elektrische Ladung geführt wurde. Cavallo (London 1795) schickte Funken von Leydener Flaschen durch Drähte »gemäss einem vorher festgesetzten Plane«. Sömmering (München 1808) konstruierte einen Telegraphen, bei dem die Signale durch Zersetzung des Wassers in Voltametern gegeben wurden; ferner wurde die Uebertragung von Signalen durch chemische Zersetzung von Körpern noch von Coxe, R. Smith, Bain und anderen angestrebt. Ampère (Paris 1821) machte den Vorschlag, ein an einer entfernten Stelle des Stromleiters befindliches Galvanometer bei der Fortpflanzung von Signalen zu benutzen. Schilling und Weber (Göttingen 1833) benutzten die Ablenkungen einer Galvanometernadel, welche sich nach links und nach rechts drehte, um einen alphabetischen Zeichenkodex längs eines einfachen Stromleiters zu telegraphieren. Cooke und Wheatstone (London 1837) brachten die erste Form ihres *Nadel*-Telegraphen in praktischen Gebrauch. Henry (New-

York 1831) benutzte die anziehende Kraft eines Elektromagnets, um Signale zu geben, indem die Bewegungen der Armatur hörbare Töne erzeugten, welche bestimmte Buchstaben repräsentierten. Morse (New-York 1837) erfand einen Telegraphen, bei welchem mittelst der Anziehung einer Armatur durch einen Elektromagnet auf einem beweglichen Papierstreifen ein Punkt oder ein Strich markiert wird. Steinheil (München 1837) machte die Entdeckung, dass an Stelle des zweiten, zurückführenden Drahtes die *Erde* benutzt werden kann, indem an beiden Enden durch in das Erdreich gesenkte Platten (Fig. 267) eine Berührung mit der Erde hergestellt wird. Gintl (1853) und Stearns (New-York 1870) erfanden Methoden des *Doppelsprechens*. Stark (Wien) und Bosscha (Leyden 1855) erfanden die Methode des *Gegensprechens* und Edison (Newark, N. J. 1874) erfand die Methode des gleichzeitigen *Doppel- und Gegensprechens*. Für den Eildienst erfand Wheatstone seinen automatischen Uebertrager, bei dem die Buchstaben darstellenden Zeichen zuerst durch eine Maschinerie auf Papierstreifen gedruckt werden; diese bewegen sich dann mit grosser Geschwindigkeit durch den übertragenden Apparat, welcher sie mit bedeutend grösserer Geschwindigkeit abtelegraphiert, als wenn die einzelnen Signale mit der Hand telegraphiert werden. Hughes erfand einen Typendrucktelegraph. Wheatstone erfand einen ABC-Telegraph, bei dem die Signale durch einen sich über einem Zifferblatt bewegenden Zeiger buchstabiert werden. Cowper (1876) und Elisha Gray (1893) erfanden autographische Schreibtelegraphen. Für den Kabeldienst erfand Kelvin sein Spiegelgalvanometer und seinen empfindlichen Heber-Aufzeichner. In diesen Vorlesungen können nur ein bis zwei der einfacheren und gebräuchlicheren Arten der telegraphischen Apparate beschrieben werden. Wer sich darüber weiter informieren will, kann die ausgezeichneten Lehrbücher über Telegraphie nachsehen, welche Preece und Sivewright, sowie Culley herausgegeben haben[1]).

---

1) Anm. d. Uebers. Ausführlichere Lehrbücher in deutscher Sprache

493. Der Nadelapparat. Der Nadelapparat (Fig. 263) besteht im wesentlichen aus einem Vertikalgalvanometer, bei welchem eine leicht beweglich aufgehängte Magnetnadel zur Rechten oder Linken abgelenkt wird, wenn durch eine die Nadel umgebende Rolle in dieser oder jener Richtungein Strom geschickt wird; die Nadel, welche vorn am Zifferblatt zu sehen ist, ist bloss ein Zeiger; die wirkliche Magnetnadel befindet sich hinter dem Zifferblatte. Durch Kombination von Bewegungen nach rechts und links wird das ganze Alphabet nach Uebereinkunft dargestellt. Um in beiden Richtungen Ströme durch den Stromleiter zu senden, wird gewöhnlich von einem »Signal-Schlüssel« Gebrauch gemacht. Der Schlüssel am einen Ende der Leitung setzt den Apparat am andern Ende in Thätigkeit; aus Zweckmässigkeitsgründen wird derselbe an dem Empfangsapparat befestigt. In Fig. 263 bilden den Schlüssel die beiden unten vorstehenden Hebel und je nachdem der rechte oder linke niedergedrückt wird, geht ein Strom in dieser oder jener Richtung durch die Drähte.

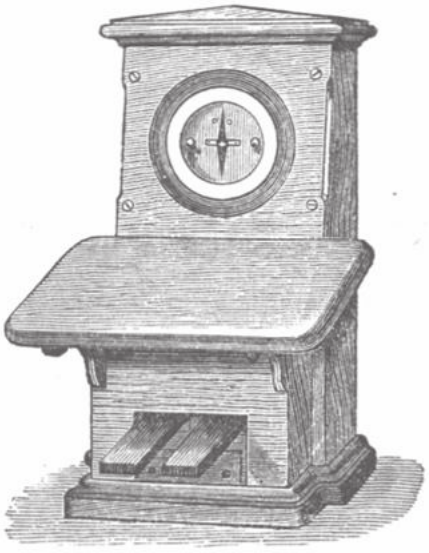


Fig. 263.

Die Wirkungsweise wird durch Fig. 264 erläutert, welche einen einzelnen Signalschlüssel darstellt. Die beiden horizontalen Hebel stehen mit der Telegraphenlinie, resp. mit dem Rückstromleiter durch die Erde in Verbindung. In der Ruhelage drücken beide gegen einen metallenen Querstreifen, welcher mit dem Zinkpole der Batterie in Verbindung steht. Am andern Ende befindet sich ein zweiter Querstreifen, welcher mit dem + (Kupfer-)Pole der Batterie in Verbindung steht. Wird der Schlüssel der Telegraphenlinie herabgedrückt, so fliesst der

---

sind u. a.: Schellen, der elektromagnetische Telegraph; Weidenbach, Kompendium der elektrischen Telegraphie.

Strom durch dieselbe hindurch und durch die Erde zurück oder in der *positiven* Richtung. Wird der Schlüssel der Erde herabgedrückt (während der Schlüssel der Telegraphenlinie den mit

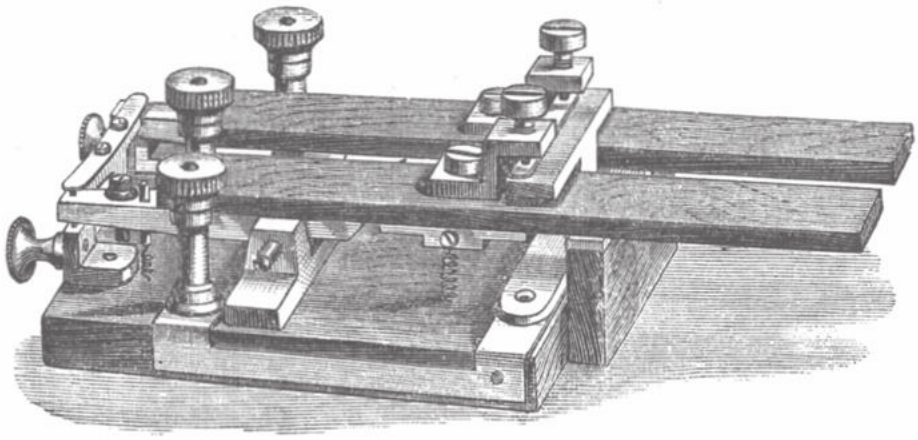


Fig. 264.

dem Zink in Verbindung stehenden Streifen berührt), so fliesst der Strom durch die Erde hin und durch die Telegraphendrähte zurück, oder in der *negativen* Richtung. Telegraphenbeamte sprechen gewöhnlich von positiven, resp. negativen *Strömen.*

494. Der Morse-Apparat. Der gebräuchlichste Apparat ist heutzutage der von Morse. Der Apparat besteht im wesentlichen aus einem Elektromagnet, welcher, sobald ein Strom durch seine Rollen geht, eine Armatur für kürzere oder längere Zeit niederzieht. Derselbe kann entweder als »*Schallapparat*« eingerichtet werden, in welchem Falle der das Telegramm empfangende Beamte auf die Schläge hört und sich notiert, ob die Intervalle zwischen denselben lang oder kurz sind; oder es kann derselbe als »*Druckapparat*« eingerichtet werden, welcher Punkte und Striche auf einem Papierstreifen verzeichnet, der durch ein Uhrwerk vor dem Apparate bewegt wird. In der allerneuesten Gestalt ist jedoch der Morse'sche Apparat als »*Tintenschreiber*« Fig. 265 angeordnet, indem die Anziehung der Armatur nach abwärts eine kleine Tintenfeder emporzieht und dieselbe gegen einen Papierstreifen drückt. Ist der Strom nur kurze Zeit geschlossen, so wird ein blosser Punkt verzeichnet. Fliesst der Strom längere Zeit, so bewegt sich der Papierstreifen weiter, und die Tintenfeder markiert einen Strich.

Das Morse'sche Alphabet ist in folgender Weise aus Punkten und Strichen zusammengesetzt:

A . —	K — . —	U . . —
B — . . .	L . — . .	V . . . —
C — . — .	M — —	W . — —
D — . .	N — .	X — . . —
E .	O — — —	Y — . — —
F . . — .	P . — — .	Z — — . .
G — — .	Q — — . —	Punkt . . . . .
H	R . — .	Wiederholungszeichen . . — — . .
I . .	S . . .	Bindestrich — . . . . —
J . — — —	T —	Apostroph . — — — — .

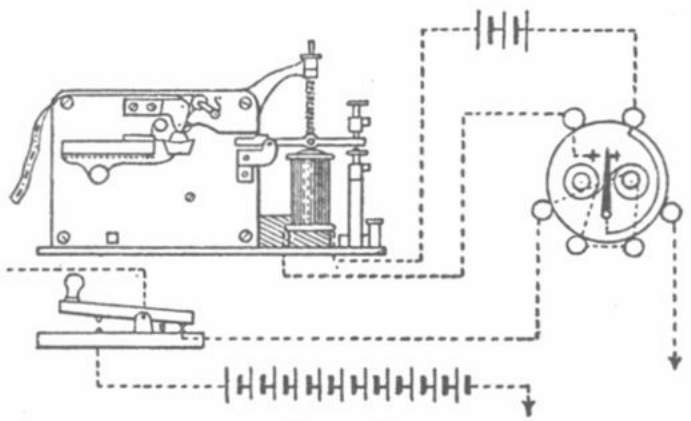


Fig. 265.

Das Morse-Alphabet der Amerikaner weicht in mehr als einer Beziehung von dem internationalen Codex ab; so z. B. unterscheiden sie die Signale einiger Buchstaben nach der Länge der Zwischenräume zwischen den Punkten und Strichen; auch benutzen sie zur Darstellung einiger Buchstaben mehr als 4 Zeichen.

Den Morseschlüssel zeigt Fig. 266. Der Draht der Linie wird mit der Zentralachse *A* verbunden; eine Feder hält das vordere Ende des Schlüssels hoch, wenn derselbe nicht gebraucht wird, so dass der Draht der Linie durch das hintere Ende des Schlüssels mit dem Empfangsapparate oder dem Relais in Verbindung steht. Drückt man den Schlüssel herunter, so wird diese Verbindung unterbrochen, und indem der Draht der Linie in Verbindung mit der stromgebenden Batterie gebracht wird, geht ein Strom durch die Linie.

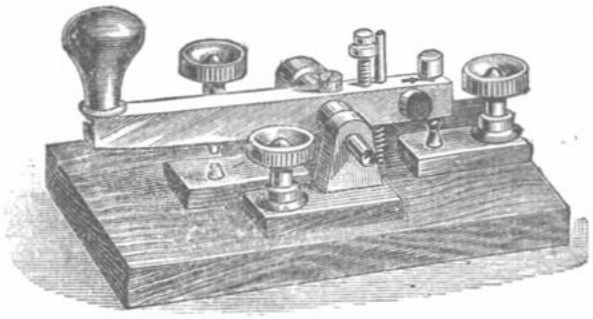


Fig. 266.

495. Telegraphieren bei offenem und geschlossenem Stromkreise. In Europa arbeiten die Telegraphen bei offenem Stromkreise, da die Batterie ausserhalb des Stromkreises ist, wenn kein Telegramm abgesandt wird. Die amerikanischen Telegraphen sind gewöhnlich für das System mit geschlossenem Stromkreise eingerichtet, da der Strom fortwährend fliesst und erst dann unterbrochen wird, wenn man ein Telegramm abschicken will. Bei der ersten Methode befindet sich an jedem Ende eine Batterie, damit die Linie von beiden Seiten in Thätigkeit gesetzt werden kann, und die Drähte werden derart verbunden, dass der Stromleiter an dem Ende, wo ein Telegramm aufgenommen wird, offen ist. Fig. 267 zeigt einen möglichst einfachen Fall einer

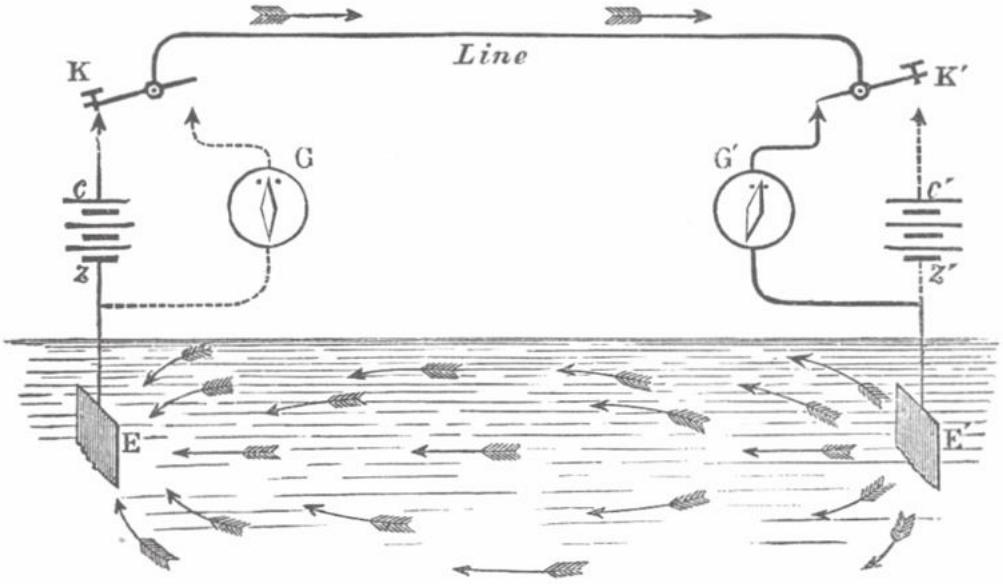


Fig. 267.

solchen Anordnung. An jedem Ende befindet sich eine Batterie *ZC*, deren einer Pol zur Erde führt, während der andere mit einem Schlüssel *K* in Verbindung steht. Dieser Schlüssel ist

so eingerichtet (vergl. Fig. 266), dass beim Niederdrücken ein Strom durch die Telegraphendrähte fliesst, während der Kontakt derselben Station unterbrochen wird. Der durch die Telegraphendrähte fliessende Strom geht durch K' in einen Aufnahmeapparat G' auf der andern Station, wo derselbe ein Signal giebt, und kehrt dann durch die Erde zu der Batterie zurück, von welcher er ausging. Eine ähnliche Batterie und ein ähnlicher Schlüssel auf der entfernten Station genügen, um in der entgegengesetzten Richtung Signale nach G zu befördern, wenn K nicht herabgedrückt ist. In der Figur erscheint G als ein einfaches Galvanometer, doch würde die Anordnung vollständig für den Morse'schen Apparat passen, welcher nur das Entsenden lang und kurz dauernder Ströme auf beiden Stationen erfordert, ohne die Richtung zu ändern.

496. Relais. Beim Telegraphieren auf weite Entfernungen oder für den Fall, wo sich in dem Stromleiter eine grössere Anzahl von Apparaten befindet, sind die Ströme häufig nicht stark genug, um den Druckapparat direkt in Thätigkeit zu setzen. In diesem Falle wird ein Relais oder Wiederholer eingeschaltet. Dieser Apparat besteht aus einem Elektromagnet, um welchen der Telegraphenstrom fliesst. Wird die leicht bewegliche Armatur desselben angezogen, so wird dadurch der Kontakt für einen lokalen Stromkreis hergestellt, in welchem eine lokale Batterie und der Morse'sche Empfangsapparat eingeschaltet sind. Das Relais beruht also auf dem Prinzipe, dass ein Strom, welcher zu schwach ist, um die Arbeit selbst zu verrichten, einen starken Strom schliesst, welcher für ihn diese Arbeit verrichtet.

In Fig. 265 ist ein Morse'scher Aufnahme-Apparat M abgebildet (ein »Tintenschreiber«), welcher mit einer lokalen Batterie LB durch einen Stromleiter verbunden ist, sowie ein Relais des brittischen Postmusters. Jedesmal, wo ein Strom in der Leitung die Zunge des Relais bewegt, wird der lokale Strom geschlossen und der Morse'sche Apparat verzeichnet auf dem Papierstreifen einen Punkt oder einen Strich. Fig. 268 giebt eine Ansicht des Normal-Relais selbst. Derselbe ist polarisiert

(Art. 382); ein permanenter dicker Stahlmagnet magnetisiert eine Zunge, welche zwischen den Polen des Elektromagnets schwebt.

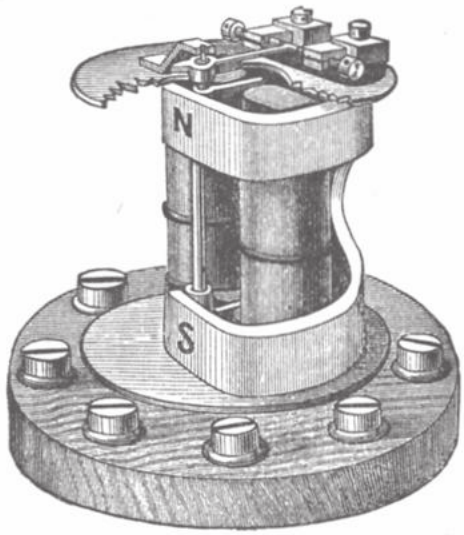


Fig. 268.

497. Störungen in Telegraphenlinien. Solche können durch verschiedene Ursachen veranlasst werden: entweder durch das Reissen der Drähte oder durch das Zertrümmern der Isolatoren, wodurch der Strom durch die Erde einen kürzern Rückweg nimmt und die Endstation gar nicht erreicht oder, wie bei oberirdischen Leitungen, durch gegenseitige Berührung zweier Leitungsdrähte. Die Telegrapheningenieure kennen verschiedene Methoden, um das Dasein und die Lage schadhafter Stellen zu entdecken; diese Methoden basieren auf genauen Messungen des Widerstandes oder der Kapazität. Reisst z. B. ein Telegraphenkabel mitten im Ozean durch, so lässt sich der Abstand zwischen dem am Ufer befindlichen Ende und der Bruchstelle dadurch berechnen, dass man den bekannten Widerstand, welchen das Kabel pro Meile bietet, mit dem Widerstande der Kabellänge bis zur Bruchstelle vergleicht und letztern durch erstern dividiert.

498. Gegensprechen. Die telegraphischen Apparate lassen sich auf zwei verschiedene Weisen derart anordnen, dass durch einen Draht gleichzeitig zwei Depeschen gesandt werden können, von jedem Ende eine. Die erste Methode, als die *Differential-Methode* bekannt, bedingt die Anwendung von Apparaten, welche mit Differential-Rollen umwunden sind, und ist auf besondere Fälle anwendbar. Die zweite Methode des Gegensprechens, als die *Wheatstone'sche Brückenmethode* bekannt, findet eine weit ausgedehntere Anwendung. Fig. 269 veranschaulicht die Hauptsache dieses Prinzipes. Die erste Bedingung für das Gegensprechen ist die, dass der Apparat jeder Station nur durch

Signale der andern Station in Thätigkeit kommt, so dass ein Beamter in R im stande ist, nach dem entfernten Apparate M' zu telegraphieren, ohne dass sein eigener Apparat M davon be-

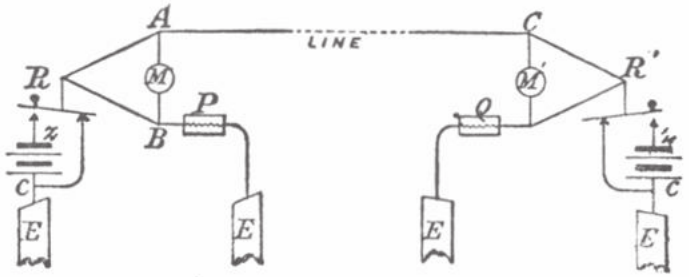


Fig. 269.

rührt wird, während sich trotzdem M im Stromleiter befindet und durch den Beamten in R' Signale aufnehmen kann. Zu dem Zwecke ist der Stromleiter bei R in zwei Zweige geteilt, von denen der eine über A zur Linie, der andere über B durch einen gewissen Widerstand zur Erde führt. Ist nun das Verhältnis der Widerstände in den Zweigen RA und RB gleich dem Verhältnis des Widerstandes der Linie und dem von P, so geht nach dem Prinzipe der Wheatstone'schen Brücke kein Strom durch M. Deshalb zeigt M die von R ausgehenden Ströme nicht an, wohl aber M', denn der Strom teilt sich bei seiner Ankunft in C in zwei Teile, von denen der eine über R' zur Erde, der andere durch M' fliesst und hier ein Signal hervorruft. Wenn unterdessen der Beamte in R' seinen Schlüssel herabdrückt und einen gleichen Strom in entgegengesetzter Richtung sendet, so fliesst keine Elektrizität mehr durch die Linie; dagegen zeigt jetzt M ein Signal an, denn obgleich in der Linie kein Strom fliesst, so fliesst doch der Strom im Zweige RA durch M abwärts, als wenn derselbe von R' käme, so dass M auf Signale, welche von R' kommen, reagiert, gleichviel, ob der Beamte in R telegraphiert oder nicht. Beim Gegensprechen werden lange Linien benutzt, sowie Kabel-Kondensatoren in den Armen RA und RB der Brücke; und an Stelle eines das Gegengewicht haltenden Widerstandes bei P und Q verwendet man ein »künstliches Kabel«, eine Kombination von Kondensatoren und Wider-

ständen, welche die elektrischen Eigenschaften der wirklichen Linie zwischen den Stationen ersetzen sollen.

Die Methode des **Doppelsprechens** besteht darin, dass gleichzeitig durch denselben Draht zwei Depeschen in derselben Richtung geschickt werden. Zu diesem Zwecke ist es erforderlich, solche Apparate zu verwenden, welche nur mit Strömen in einer gegebenen Richtung arbeiten. Die Methode bedingt die Anwendung von »Relais«, bei denen die Armaturen selbst permanent magnetisiert (oder »polarisiert«) sind, und welche daher nur auf Ströme in einer Richtung reagieren.

Endlich giebt es noch eine Methode, welche das **Doppelsprechen und Gegensprechen** vereint. Bei einer und derselben Linie werden zwei Sorten von Apparaten benutzt; die eine Sorte (von einem »polarisierten« Relais getrieben) arbeitet nur dann, wenn die *Richtung* des Stromes geändert wird; die andere Sorte (von einem nicht-polarisierten Relais getrieben, welches mit Federn versehen ist, so dass es sich nur bei einem bestimmten Minimum an Kraft bewegt) arbeitet nur dann, wenn die *Stärke* des Stromes sich ändert, und ist unabhängig von der Richtung der Ströme.

LI. VORLESUNG: *Kabel-Telegraphie.*

499. Unterseeische Telegraphen. Der telegraphische Verkehr zwischen zwei durch einen Meeresarm oder den Ozean getrennten Ländern wird durch Kabel vermittelt, welche auf den Grund des Meeres versenkt sind, und welche aus leitenden Drähten gemacht sind, die durch eine äussere Hülle aus isolierendem Material geschützt werden. Der Konduktor ist gewöhnlich ganz reiner Kupferdraht, welcher 70—400 Pfund pro Seemeile wiegt, und in siebenfachen Strängen geflochten, um die Gefahr des Reissens zu verhüten. Fig. 270 und 271 zeigen in natürlicher Grösse Teile der Atlantischen Kabel, welche in den Jahren 1857 und 1866 gelegt wurden. Bei dem letztern Kabel, welches den gebräuchlichen Typus für lange Linien zeigt, wird

der Kern zunächst durch eine starke Guttapercha-Schicht geschützt, darauf durch ein Hanfgewebe, und auf der Aussenseite noch durch eine aus zehn eisernen Drähten bestehende Scheide,

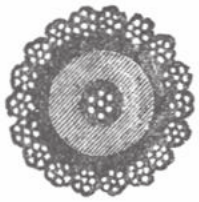


Fig. 270.

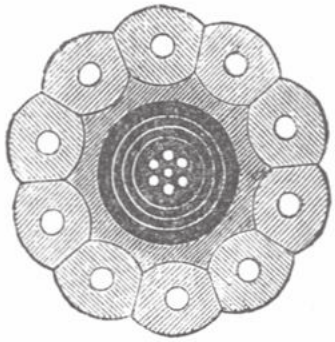


Fig. 271.

von denen jeder mit Hanf umwickelt ist. Die *Uferenden* sind in noch stärkerer Weise durch äussere Drähte geschützt.

500. Geschwindigkeit des Telegraphierens durch Kabel. Depeschen, welche durch lange Kabel gehen, erleiden aus zwei Gründen eine Verzögerung:

1) Die Selbstinduktion des Stromleiters verhindert, dass der Strom sogleich seine volle Stärke erreicht; die Verzögerung wird durch die in Art. 455 angegebenen Gleichungen von Helmholtz angegeben.

2) Wird das Kabel in seiner isolierenden Hülle ins Wasser versenkt, so wirkt dasselbe wie eine Leydener Flasche von ungeheurer Kapazität (wie in Art. 296 erklärt worden ist) und die ersten Teile des Stromes fliessen nicht durch das Kabel hindurch, sondern bleiben in demselben als elektrostatische *Ladung*. Für jedes einzelne Signal muss das Kabel wenigstens teilweise geladen und entladen werden. Wenn ein Strom durch ein Atlantisches Kabel von Irland nach New-Foundland geschickt wird, so vergehen, wie Culley beobachtet, zwei Zehntel einer Sekunde, bevor ein höchst empfindlicher Apparat auf der Empfangsstation reagiert, und drei Sekunden, ehe der Strom seine volle Stärke erreicht, indem er in einer durch das Kabel fortschreitenden elektrischen Welle wächst. Auch nimmt die Stromstärke allmählich ab, wenn der Stromleiter unterbrochen wird. Diese Verzögerung ist mehr eine Folge der elektrostatischen Ladung

als der elektromagnetischen Selbstinduktion. Die Anzahl der Signale, welche man in einer bestimmten Zeit durch ein Kabel schicken kann, ist um so geringer, je grösser Kapazität und Widerstand sind. Die Zeit, welche erforderlich ist, um eine bestimmte Anzahl von Signalen durch ein Kabel von der Kapazität K und dem Widerstande R zu schicken, ist dem Produkte K.R proportional; demnach ist die Verzögerung dem *Quadrate der Kabellänge* proportional. Die verschiedenen in Anwendung gebrachten Mittel, um diese Verzögerung zu beseitigen, sind in Art. 297 erklärt worden. Gewöhnlich schaltet man in den Stromkreis an beiden Enden des Kabels einen Kondensator von mehreren Mikrofarad ein, durch welchen die Signale hindurchgehen. Da der Kondensator zu entladen strebt, so trägt dies dazu bei, die Signale einzuschränken und jedes derselben kürzer und schärfer zu machen. Theoretisch ist es denkbar (vergl. Art. 468), die Kapazität durch Selbstinduktion zu kompensieren. Da jedoch die Kapazität eines Kabels nicht longitudinal, sondern seitlich, und auf die ganze Länge desselben verteilt ist, so müsste man die Selbstinduktions-Spulen, welche die Verzögerung kompensieren sollen, als Nebenschluss an verschiedenen Stellen anbringen. Ein Kabel, welches etwa in seiner Mitte einen solchen Nebenschluss hat, leitet die Signale schneller als ein Kabel, welches diese Kompensation nicht hat.

501. Empfangsapparate für Kabel. Das *Spiegelgalvanometer* von Kelvin (Art. 210) wurde zum Zwecke des Telegraphierens durch Kabel erfunden, indem die Bewegungen des Lichtfleckes, welcher in kurzen oder langen Abständen über die Skala gleitet, genügt, um die Punkte und Striche des Morse'schen Alphabets zu telegraphieren. Der *heberförmige Schreibapparat* von Kelvin verzeichnet die Signale auf einem Papierstreifen in folgender kunstvollen Weise: Das Kabel steht mit einer lose aufgehängten Drahtspule in Verbindung, welche zwischen den Polen eines kräftigen Magnets schwebt. An der aufgehängten Spule ist ein feiner Glasheber befestigt, der an einem seidenen Faden aufgehängt ist, dessen eines Ende in ein Gefäss mit Tinte taucht.

Die Tinte wird auf einen Papierstreifen gespritzt (der durch ein Uhrwerk in senkrechter Richtung hinter dem Heber bewegt wird) und zwar ohne Reibung, da der Heber eine kontinuierliche Schwingung vollführt. Der Heber verzeichnet eine wellenförmige Linie mit kurzen und langen Wellen, welche Punkte und Striche ersetzen.

LII. VORLESUNG: *Verschiedene Telegraphen.*

502. Varley machte den Vorschlag, auf elektrischem Wege musikalische Töne weiter zu leiten, welche, unterbrochen, wie Punkte und Striche tönen. Dies erforderte die Uebertragung von Strömen, die entweder schnell alternierten oder schnell intermittierten. Gray, welcher nach diesem System *harmonische Telegraphen* konstruierte, gelang es, fünf bis sechs Telegramme gleichzeitig in einer Linie weiter zu leiten.

Benutzt man an jedem Ende einer Linie zwei gleichzeitig rotierende Verteilerscheiben, so ist es möglich, mehrere Telegramme auf einmal durch eine Linie zu schicken; denn die (von Delany erfundenen) Verteiler bringen jeden übertragenden Apparat mit seinem entsprechenden Empfangsapparate zum Anschluss, für einen kurzen Bruchteil einer Sekunde in regelmässigen kurzen Intervallen.

503. Elektrische Glocken. Die gewöhnliche Form der *elektrischen Glocke* (erfunden von Mirand im Jahre 1850) ist ein Elektromagnet, welcher einen Hammer hin und her bewegt, indem er denselben abwechselnd anzieht und wieder loslässt, so dass derselbe gegen eine Glocke schlägt. Die Einrichtung des Apparates macht Fig. 272 anschaulich, wo E der Elektromagnet und H der Hammer ist. Eine aus 1 bis 2 Leclanché'schen Elementen bestehende Batterie, die an irgend einer geeigneten Stelle des Stromleiters aufgestellt ist, liefert erforderlichen Falls den Strom. Indem man den Drücker P berührt, wird der Stromkreis geschlossen, und es geht ein Strom durch den Draht und die Rollen des Elektromagnets, welcher sofort ein kleines Stück

weichen Eisens anzieht, das an dem in dem Hammer H endigenden Hebel befestigt ist. Der Hebel selbst ist in den Stromleiter eingeschaltet, indem der Strom oben in denselben eintritt und denselben bei C mittelst eines Unterbrechers verlässt. Dieser besteht aus einer am Ende mit Platin belegten Feder, welche gegen die Platinspitze einer Schraube drückt, von wo ein Draht

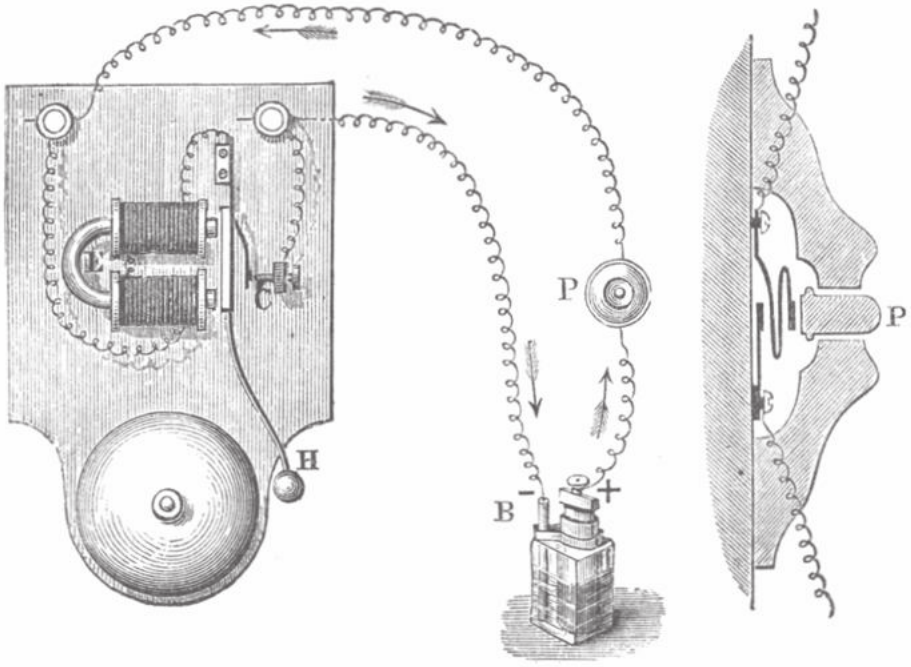


Fig. 272.

zurück nach dem Zinkpole der Batterie führt. Sobald der Hebel angezogen wird, wird der Stromleiter bei C unterbrochen, da die Schraube von der Feder nicht mehr berührt wird. Folglich hört der Strom auf und der Elektromagnet lässt die Armatur los. Hebel und Hammer fallen daher zurück, stellen die Berührung bei C wieder her, worauf der Hammer zum zweiten Male angezogen wird, und so weiter. Den Drücker P sieht man rechts in Fig. 272 von der Seite. Derselbe besteht gewöhnlich aus einem cylindrischen Knopf von Elfenbein oder Porzellan, der sich lose durch eine kreisförmige Oeffnung einer Bekleidung von Holz oder Porzellan bewegen kann, und der beim Niederdrücken eine mit Platin belegte Feder gegen einen Metallstift presst und auf diese Weise zwischen den beiden Teilen des unterbrochenen Stromkreises die Berührung herstellt. Glocken, welche eine polarisierte Armatur, aber keinen Unterbrecher haben,

benutzt man als Rufglocken bei Telephonen. Der Generator ist dann eine kleine Magnet-Wechselstrommaschine (Fig. 237), die durch eine Handhabe getrieben wird.

504. Elektrische Uhren und Chronographen. Uhren können durch elektrische Ströme entweder getrieben oder kontrolliert werden. Bain, Hipp und andere haben elektrische Uhren der ersten Art erfunden, bei denen die gewöhnliche bewegende Kraft eines Gewichtes oder einer Feder keine Anwendung findet, indem die Uhr durch ein Pendel getrieben wird, dessen »Linse« ein von beiden Seiten abwechselnd angezogener Elektromagnet ist. Die Schwierigkeit, einen vollkommen konstanten Strom zu unterhalten, war der Grund, dass solche Uhren nicht in allgemeinen Gebrauch gekommen sind.

Grössern Nutzen gewährte die Erfindung von Uhren, die auf elektrischem Wege kontrolliert und die von einer Normaluhr getrieben werden. Bei diesen ist das Normal-Chronometer derart konstruiert, dass es in periodischen Zwischenräumen einen Stromleiter schliesst, etwa einmal in jeder Minute oder in jeder halben Minute. Die hindurchgeführten Ströme setzen die Zeiger eines Systems von an verschiedenen Stellen befindlichen Zifferblättern in Bewegung, indem sie durch einen hinter jedem Zifferblatt aufgestellten Elektromagnet eine Armatur anziehen, welche mittelst eines Sperrhakens auf ein Sperrrad wirkt, wodurch dasselbe während jedes bestimmten Intervalls um einen Zahn weiter bewegt wird. Auf diese Weise drehen sich die Zeiger mit derselben Geschwindigkeit wie die einer Normaluhr.

Elektrische *Chronographen* werden zur Messung sehr kleiner Zeitintervalle benutzt. Ein an der Armatur eines Elektromagnets befestigter Stift verzeichnet eine Linie auf einem Stück Papier, das an einem durch ein Uhrwerk in Umdrehung versetzten Cylinder befestigt ist. Ein durch die Rollen des Elektromagnets gehender Strom bewegt die Armatur und erzeugt eine seitliche Ausbiegung in der so verzeichneten Linie. Zwei Ströme werden durch zwei Ausbiegungen markiert, und aus dem *räumlichen* Intervall zwischen beiden Ausbiegungen lässt sich das *zeitliche* Inter-

vall, welches zwischen den beiden Strömen verfloss, bis auf den 10,000ten Teil einer Sekunde berechnen, vorausgesetzt, dass man die Umdrehungsgeschwindigkeit genau kennt. Die Geschwindigkeit, mit der sich eine Kanonenkugel innerhalb des Rohres der Kanone bewegt, kann auf diese Weise gemessen werden.

KAPITEL XIII.

TELEPHONIE.

LIII. VORLESUNG: *Elektrische Telephone.*

505. Die ersten Telephone. Der erste erfolgreiche Versuch, einen Schall auf elektrischem Wege zu übertragen, wurde im Jahre 1861 von Reis angestellt, dem es gelang, musikalische und andere Töne durch ein unvollkommenes Telephon zu übertragen. Bei diesem Apparate wirkte die Stimme auf eine lose Berührungsstelle in einem elektrischen Stromkreise, und indem jene Teile fester oder loser zur Berührung gebracht wurden (Art. 395), variierte danach der Widerstand des Stromkreises. Der übertragende Teil des Telephons von Reis bestand aus einer Batterie und einem Unterbrecher, welch letzterer aus einem Trommelfell oder Diaphragma ausgespannter Membran gebildet war und Schallwellen in sich aufnehmen konnte. An demselben war ein dünner, elastischer Platinstreifen befestigt, der beim Vibrieren gegen die Spitze eines Platindrahtes anschlug und auf diese Weise bei jeder Schwingung die Berührung gänzlich oder teilweise herstellte oder unterbrach, genau ebenso, wie dies bei den Kohleberührungen in den neuern Uebertragern von Blake, Berliner etc. der Fall ist. Der empfangende Teil des Apparates bestand aus einem Eisendrahte, der an einem Resonanzboden befestigt war und den eine isolierte Drahtspirale umgab, welche einen Teil des Stromleiters bildete. Die schnelle Magnetisierung und Entmagnetisierung eines solchen Eisenkerns erzeugt hörbare

Schallwellen (Art. 124). Aendert sich der Strom, so wird der Eisendraht zum Teil magnetisiert und entmagnetisiert und es entstehen dementsprechend Schwingungen von verschiedenen Amplituden und Formen; folglich wird ein solcher Draht in vollkommener Weise als Empfangsapparat dienen, welcher gesprochene Worte wieder hervorbringt, wenn ein guter Geber gebraucht wird. Reis selbst pflanzte mit Hilfe seines Apparates gesprochene Worte weiter fort, aber nur in unvollkommener Weise, denn alle Töne der Sprache lassen sich nicht durch plötzliche Stromunterbrechungen übertragen, welche bei dem Geber von Reis leicht vor sich gehen, wenn in denselben hineingesprochen wird, da der Kontakt ein sehr loser ist. Dieselben erfordern leichte Schwingungen, bald einfache, bald zusammengesetzte, entsprechend der Natur des Tones. Die Vokale werden durch periodische und zusammengesetzte Schwingungen in der Luft erzeugt; während die Konsonanten zum grössten Teil nicht periodisch sind.

Reis erfand auch einen zweiten Empfangsapparat, bei dem ein Elektromagnet eine elastisch aufgehängte Eisenarmatur anzog, welche infolge der Anziehung des mehr oder weniger unterbrochenen Stromes hin und her vibrierte.

Im Jahre 1876 erfand Elisha Gray einen Uebertrager, bei welchem das gesprochene Wort auf einen veränderlichen Wasser-Widerstand wirkt, der aus einem in Wasser tauchenden Platindraht gebildet wird. Er konstruierte einen elektromagnetischen Empfangsapparat.

Ferner erfanden Varley und Dolbear Telephonempfänger, bei denen die Anziehung zwischen den mit entgegengesetzten Elektrizitäten geladenen Armaturen eines *Kondensators* zur Erzeugung von Tönen benutzt wurde. Dolbear's Empfänger besteht bloss aus zwei dünnen Metallscheiben, die durch eine sehr dünne Luftschicht von einander getrennt sind. Je nachdem die veränderlichen Ströme in diesen Kondensator einfliessen oder wieder ausströmen, ziehen sich die beiden Scheiben mit grösserer oder geringerer Kraft an; hierdurch entstehen Schwingungen, welche denen des ursprünglichen Tones entsprechen.

Im Jahre 1876 erfand Graham Bell das Magneto-Telephon. Bei diesem Apparate spricht der Redende gegen eine elastische Platte von dünnem Eisenblech, welche vibriert und jede ihrer Bewegungen auf elektrischem Wege auf eine ähnliche Platte in einem ebenso eingerichteten Telephone an einer entfernten Station überträgt, und sie genau in dieselben Vibrationen versetzt, wodurch dann dieselben Töne erzeugt werden. Die Uebertragung der Vibrationen hängt mit den Prinzipien der in der 18. Vorlesung erklärten magneto-elektrischen Induktion zusammen.

Fig. 273 zeigt das Bell'sche Telephon im Querschnitt. Die Scheibe D befindet sich hinter einem konischen Mundstücke, an welches der Sprecher seinen Mund oder der Hörer sein Ohr hält. Hinter der Scheibe liegt ein Magnet AA, welcher der Länge nach durch den Apparat führt; und um seinen vordern Pol, welcher beinahe die Scheibe berührt, ist eine kleine Spule befestigt, auf welche eine Rolle C aus feinem, isoliertem Drahte gewunden ist, dessen Enden mit den Endschrauben FF verbunden sind.

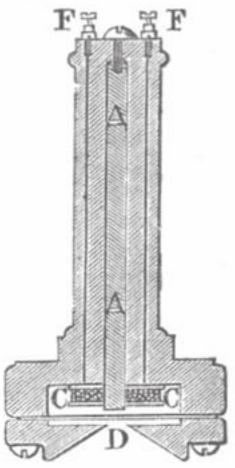


Fig. 273.

Von diesen Apparaten dient der eine als Geber, der andere als Empfänger der Töne; beide sind durch zwei Drähte zu einem Stromkreise verbunden. Eine Batterie ist nicht erforderlich, denn der Geber selbst erzeugt die induzierten Ströme in folgender Weise: Der Magnet AA induziert eine gewisse Anzahl von durch die Rolle C führenden Kraftlinien. Viele von ihnen gehen in die eiserne Scheibe. Bewegt sich diese beim Vibrieren nach dem Magnetpole zu, so wird sie von mehr Kraftlinien getroffen; entfernt sie sich vom Magnetpole, so wird sie von weniger Kraftlinien getroffen. Ihre hin und her gehende Bewegung *ändert also die Zahl der Kraftlinien, welche durch den Hohlraum der Rolle C führen,* und erzeugt demnach (Art. 220) in dem Drahte der Rollen Ströme, deren Stärke dem Wechsel der Anzahl von Kraftlinien proportional ist. Das Bell'sche Telephon kann daher, wenn es als Geber benutzt wird, als magnetelektrischer Generator angesehen

werden, der durch Hin- und Hervibrieren Ströme von alternierenden Richtungen in den Draht schickt. Kommen die Ströme am andern Ende an, so fliessen sie in der einen oder andern Richtung durch die Rolle und vermehren oder vermindern daher vorübergehend die Stärke des Magnets. Fliesst der Strom durch die Spiralen in solcher Richtung, dass der Magnet an Stärke zunimmt, so zieht derselbe die vor ihm befindliche Eisenscheibe stärker als zuvor an. Hat der Strom die entgegengesetzte Richtung, so wird die Scheibe weniger stark angezogen und entfernt sich vom Magnet. Welche Bewegung also auch der Scheibe des gebenden Telephons mitgeteilt wird, die Scheibe des empfangenden Telephons muss dieselbe wiederholen, und versetzt daher die Luft in dieselben Schwingungen, und erzeugt auf diese Weise den Ton von neuem. Die Bell'sche Methode der Uebertragung benutzt man heute nur noch für ganz kurze Linien. Bei der modernen Telephonie ist die Reis'sche Methode wieder aufgenommen, wo man einen besondern Uebertrager mit einer Batterie benutzt, und den Bell'schen Apparat nur als Empfänger und nicht als Uebertrager verwendet.

506. Das Telephon von Edison. Edison konstruierte zur Uebertragung gesprochener Worte ein Telephon, bei welchem die Vibrationen der Stimme auf ein Diaphragma von Glimmer wirken, wodurch dasselbe eine grössere oder geringere Kompression auf einen Knopf präparierten Lampenrusses ausübte, welcher in den Stromkreis eingeschaltet war. Der Widerstand desselben wird durch den Druck der Berührungsstellen beeinflusst; folglich bietet der Knopf infolge der sich ändernden Drucke, welche von den Vibrationen herrühren, einem durch den Stromkreis (von der Batterie aus) fliessenden Strome einen wechselnden Widerstand, und die Stromstärke variiert dementsprechend. Dieser variierende Strom kann daher, wie vorher, von einem elektromagnetischen Empfänger des oben beschriebenen Musters aufgenommen werden und dort entsprechende Schwingungen hervorrufen. Auch dieser Apparat findet keine Anwendung mehr, da er durch Uebertrager nach dem Muster

der Mikrophone ersetzt wird. Edison hat auch einen besonders kräftigen Empfangsapparat erfunden, der mit einer merkwürdigen von ihm entdeckten Thatsache zusammenhängt, dass nämlich die Reibung, welche eine gegen einen rotierenden, feuchten Kreidecylinder drückende Platinspitze verursacht, schwächer wird, wenn ein Strom zwischen beiden Körpern hindurchgeht. Wird die Spitze an einer elastischen Scheibe befestigt, so gerät letztere in Schwingungen, welche den veränderlichen Strömen entsprechen, die von dem Geber des Sprechers kommen.

507. Mikrophone. Im Jahre 1878 machte Hughes die Entdeckung, dass ein *loser Kontakt* zwischen zwei Leitern, welche zu einem Stromkreise gehören, in welchen eine kleine Batterie und ein Empfangs-Telephon eingeschaltet sind, dazu dienen kann, Töne zu übertragen, ohne die Vermittlung eines besondern Trommelfells oder Diaphragmas, wie diejenigen von Reis und Edison, weil die geringsten Schwingungen die Grösse des Widerstandes (Art. 395) an der Stelle, wo ein loser Kontakt stattfindet, beeinflussen. Das **Mikrophon** (Fig. 274) ist eine Anwendung

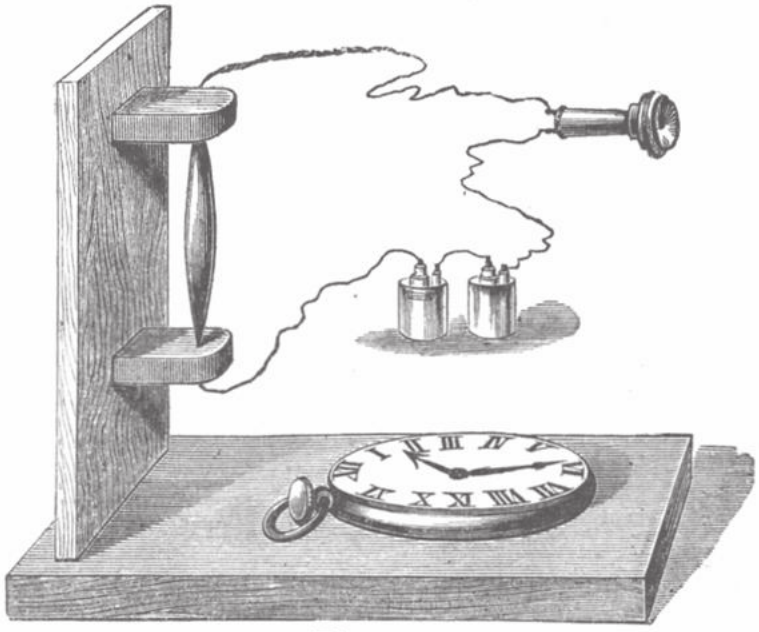


Fig. 274.

dieses Prinzips. In der Form, wie sie die Figur darstellt, wird ein kleiner dünner Kohlestift lose zwischen zwei kleine Scheiben aus demselben Stoffe eingeklemmt, welche an einem Resonanzboden von dünnem Fichtenholz befestigt sind; die Scheiben

stehen mit 1 bis 2 kleinen Elementen und einem Bell'schen Telephone in Verbindung, welches als Empfänger dient. Die Schwingungen dieses Telephons sind unter Umständen viel grösser, als diejenigen der ursprünglichen Töne und deshalb kann das Mikrophon, wie sein Name andeutet, dazu dienen, schwache Töne zu verstärken, wie z. B. das Ticken einer Uhr oder die Fusstritte eines Insekts, und dieselben hörbar zu machen. Bei der modernen Telephonie sind Mikrophone unter dem Namen *Kohleübertrager* allgemein im Gebrauch. Bei dem Uebertrager von Blake wird ein Platinstift durch eine kleine Feder gegen einen polierten Pflock aus harter Kohle gepresst, wodurch ein empfindlicher Kontakt hergestellt wird, durch welchen der Strom fliesst. Dieser elektrische Mechanismus ist hinter einer Metallscheibe angebracht, um die Vibrationen der Stimme des Sprechenden aufzunehmen. Bei dem laut sprechenden Uebertrager von Hunnings wird ein körniger Kohlestift lose zwischen zwei Metallflächen gestellt, so dass der Strom durch die lockern Teilchen fliesst. Die Stimme wirkt auf alle losen Kontakte zugleich.

Bei allen längern Linien wird der Mikrophonübertrager mit einer Batterie von ein bis zwei Elementen durch einen kleinen lokalen Stromkreis von geringem Widerstande verbunden, in welchen der primäre Draht eines kleinen Transformators oder einer Induktionsrolle eingeschaltet ist. Die sekundäre Wicklung dieses Transformators ist eine Rolle, bestehend aus zahlreichen Windungen dünnen Drahtes, welcher durch die Linie und die Rückleitungen viel schwächere Ströme mit höherer Spannung fortpflanzt.

508. Zentralstationen für Telephonie. Damit möglichst viele Abonnenten mit einander durch das Telephon verkehren können, werden die Leitungen vom Apparate jedes einzeln Abonnenten nach einer *Zentralstation* geführt. Hier endigt jede Linie in einen Klappenschrank, der so eingerichtet ist, dass der Beamte ohne weiteres die Verbindung zwischen den Telephonen zweier beliebiger Abonnenten herstellen kann, so dass letztere mit einander sprechen können.

509. Induktions-Wage von Hughes. Die ausserordentliche Empfindlichkeit des Bell'schen Telephons (Art. 505) für die schwächsten Ströme gab Veranlassung, dasselbe zur Auffindung von Strömen zu benutzen, welche zu schwach sind, um auf ein noch so empfindliches Galvanometer zu wirken. Die Ströme müssen jedoch intermittierende sein, denn sonst versetzen sie die Scheibe des Telephons nicht in Vibration. Hughes wandte diese Eigenschaft des Telephons auf einen Apparat an, welcher Induktionswage (Fig. 275) genannt wird. Eine kleine

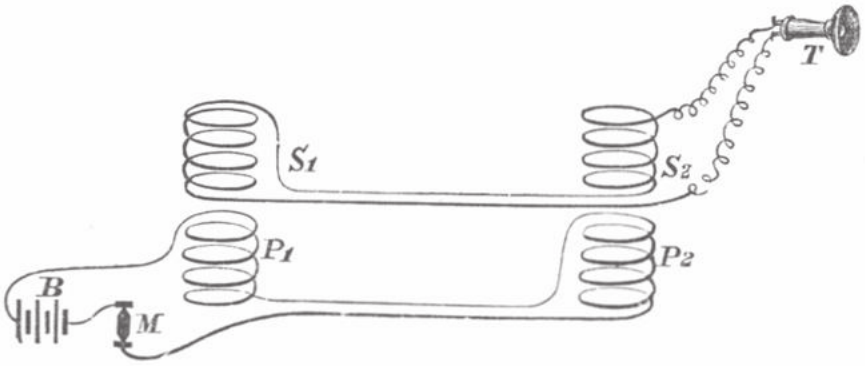


Fig. 275.

Batterie B, welche mit einem Mikrophon M verbunden ist, führt durch zwei Drahtrollen P_1 und P_2, welche um in geeigneter Weise aufgestellte Spulen gewunden sind. Ueber diesen beiden primären Rollen befinden sich zwei gleich grosse sekundäre Rollen S_1 und S_2, welche gleich viel Dratwindungen enthalten. Die sekundären Rollen stehen mit einem Telephon T in Verbindung und sind nach entgegengesetzten Seiten gewunden. Hieraus folgt, dass jedesmal, wenn ein Strom in den primären Rollen zu fliessen anfängt oder zu fliessen aufhört, P_1 einen Strom in S_1 und P_2 einen in S_2 induziert. Da S_1 und S_2 nach entgegengesetzten Seiten gewunden sind, so heben sich die beiden auf diese Weise in ihnen induzierten Ströme gegenseitig auf, und halten sich, wenn sie von gleicher Stärke sind, so genau das Gleichgewicht, dass kein Ton an dem Telephone vernommen wird. Vollkommenes Gleichgewicht kann jedoch nur dann erzielt werden, wenn die Widerstände und die Koeffizienten der gegenseitigen und der Selbst-Induktion einander gleich sind. Wird

ein plattes Stück Silber oder Kupfer (z. B. eine Münze) zwischen S_1 und P_1 gebracht, so findet in S_1 eine geringere Induktion statt, als in S_2, denn ein Teil der Induktionskraft von P_1 wird jetzt dazu verwendet, um in der Metallmasse (Art. 452) Ströme zu erwecken, und an dem Telephon vernimmt man jetzt einen Ton. Das Gleichgewicht kann jedoch dadurch wieder hergestellt werden, dass man den Abstand zwischen P_2 und S_2 so lange vergrössert, bis die Induktion in S_2 wieder ebenso gross wie die in S_1 geworden ist, wo dann die Töne am Telephon abermals aufhören. Auf diese Weise kann man die relative Leitungsfähigkeit verschiedener Metalle untersuchen, welche man in die Spiralen einführt. Es ist sogar möglich, eine Münze in Bezug auf ihre Aechtheit durch die auf diese Weise gewonnene Angabe ihrer Leitungsfähigkeit zu prüfen. Die Induktionswage ist auch in der Chirurgie von Graham Bell angewendet worden, um das Vorhandensein einer Kugel in einer Wunde zu entdecken, denn ein Metallstück, welches einige Zentimeter von den Rollen entfernt ist, vermag die Induktion zu stören.

KAPITEL XIV.

ELEKTRISCHE WELLEN.

VORLESUNG LIV: *Oscillationen und Wellen.*

510. Elektrische Oscillationen. Wenn man einen geladenen Kondensator oder eine Leydener Flasche langsam durch einen Konduktor von hohem Widerstande entladet, etwa durch einen fast trockenen, leinenen Faden, so nimmt die Entladung anfangs an Stärke zu und hört dann allmählich auf. Entladen wir dagegen den Kondensator durch eine Drahtspule von einer oder mehreren Windungen (und lassen den Funken zwischen polierten Knöpfen überspringen, um vorzeitige Partialentladungen durch Winde oder Büschel zu verhüten), so ist der Erfolg ein ganz anderer, denn jetzt besteht die Entladung aus einer Reihe von ausserordentlich schnellen Oscillationen oder Wellen. Dies ist eine Folge der Selbstinduktion des Stromleiters, wonach der einmal ins Leben gerufene Strom weiter zu dauern strebt (Art. 453). Die erste Entladung leert den Kondensator vollständig und ladet ihn sogar entgegengesetzt. Dann folgt eine umgekehrte Entladung, welche ebenfalls den Kondensator entgegengesetzt ladet, also wieder in dem Sinne wie er anfangs geladen war, und so weiter. Jede folgende Oscillation ist schwächer als die vorhergehende, so dass die Entladung nach einer Anzahl von Oscillationen aufhört (Fig. 276). Der Funken einer auf diese Weise entladenen Flasche besteht thatsächlich aus einer Anzahl von Funken, welche in wechselnder Richtung auf einander folgen. Ein Beweis hierfür ist, wie Henry im Jahre 1842 an den Ver-

suchen von Savery zeigte, folgender: Benutzt man die Flaschenentladung durch eine Rolle dazu, um Stahlnadeln zu magnetisieren, so ist die Polarität des Magnetismus bald diese, bald die entgegengesetzte.

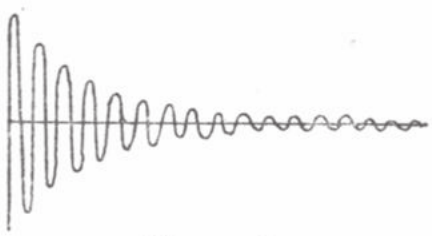


Fig. 276.

Dass eine Entladung unter gewissen Umständen oscillatorisch werden muss, wurde schon von Helmholtz bemerkt. Kelvin sagte im Jahre 1855 diese Umstände voraus. Bezeichnet man mit K die Kapazität des Kondensators (in Farad), den Widerstand des Stromkreises mit R (Ohm) und den Koeffizienten der Selbstinduktion mit L (Henry), so finden Oscillationen statt oder nicht, je nachdem

$$R \lessgtr \sqrt{4L : K}.$$

Im erstern Falle ergiebt sich die Anzahl n der Oscillationen aus der Gleichung:

$$2\pi n = \sqrt{\frac{1}{KL} - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

Beispiel. Es sei $K = 0{,}01$ Mikrofarad, $L = 0{,}00001$ Henry und $R = 0$, so ist $n = 503{,}000$.

Ist R klein, so ist n näherungsweise $= 1 : 2\pi\sqrt{KL}$. Durch Vergrösserung von K oder L lassen sich die Oscillationen verlangsamen. Bei der Entladung einer gewöhnlichen Leydener Flasche dauern sie nur den 10,000ten bis 10,000,000ten Teil einer Sekunde. Durch Benutzung von Rollen mit gut isoliertem Drahte und grossen Kondensatoren gelang es Lodge, die Oscillationen auf 400 pro Sekunde zu verlangsamen; der Funke war dann von einem musikalischen Tone begleitet. Eisen behält seine magnetischen Eigenschaften selbst für Oscillationen von $n = 1{,}000{,}000$ pro Sekunde.

Feddersen untersuchte in der Folge den Funken einer Leydener Flasche mit Hilfe eines rotierenden Spiegels und beobachtete statt einer einfachen augenblicklichen Entladung bestimmte Oscillationen [1]). Bei sehr geringen Widerständen des Stromkreises

1) Diese elektrischen Oscillationen wurden auch von Schiller, Overbeck, Blaserna und Andern untersucht, besonders aber von Hertz; vergl. Art. 515.

ergab sich für kurze Zeit eine wirkliche, hin- und hergehende Oscillation der Elektrizität. Die Periode der Oscillationen war der Quadratwurzel aus der Kapazität des Kondensators proportional. Bei einem bestimmten grösseren Widerstande wurde die Entladung kontinuierlich, ohne jedoch momentan zu sein. Bei einem noch grösseren Widerstande bestand die Entladung aus einer Reihe von teilweisen, intermittierenden Entladungen, die in gleicher Richtung auf einander folgten. Betrachtete man solche Funken in dem rotierenden Spiegel, so erblickte man eine Reihe von einzelnen Bildern in annähernd gleichen Abständen von einander.

511. Elektrische Wellen. Obgleich das Stärker- und Schwächerwerden der Ströme, (z. B. in Kabeln) bisweilen oberflächlich als Stromwellen bezeichnet wird, so sind diese Erscheinungen doch ganz verschieden von den wahren elektrischen oder elektromagnetischen *Wellen,* welche sich im Raume ausbreiten. Hier werden Teile der Energie des Stromes oder der Entladung von dem Konduktor abgegeben und kehren nicht zu demselben zurück, sondern pflanzen sich im Raume weiter fort. Wenn ein Strom an Stärke zunimmt, so nimmt auch das um ihn liegende magnetische Feld zu, indem die magnetischen Linien vom Konduktor nach aussen sich ausdehnen, wie die Wellen auf einem Teiche. Nimmt aber die Stromstärke ab, so gehen die magnetischen Linien sämtlich zurück und treten nicht aus dem Konduktor heraus: Die Energie des magnetischen Feldes kehrt in das System zurück. Wenn wir jedoch die langsam wachsenden und abnehmenden Ströme durch elektrische Oscillationen von ausserordentlicher Geschwindigkeit ersetzen, so strahlt ein Teil ihrer Energie in das umgebende Medium als *elektromagnetische Wellen* aus und nur ein Teil kehrt zurück. Diese Wellen besitzen, wie sich sogleich zeigen wird, alle optischen Eigenschaften der Lichtwellen: sie können reflektiert, gebrochen, polarisiert u. s. w. werden.

Es ist eine fundamentale Vorstellung über elektrische Kräfte, dass bei einer elektrischen Verschiebung (Art. 57) in einem

dielektrischen Körper die Wirkung auf das umgebende Medium dieselbe ist, als wenn eine Uebertragung der Elektrizität durch Leitung, statt durch Induktion stattgefunden hätte. Maxwell nannte den Wechsel der Verschiebung den **Verschiebungsstrom.** Der Versuch beweist, dass Verschiebungsströme während ihrer Dauer magnetische Felder in ihrer Nachbarschaft erzeugen, in derselben Weise, wie dies bei Konvektionsströmen (Art. 392) und Konduktionsströmen der Fall ist.

512. Resonanz. Wenn zwischen der Kapazität, der Selbstinduktion eines Stromleiters und der Frequenz der periodischen Ströme gewisse Relationen bestehen, so neutralisieren sich die hemmenden Wirkungen dieser Dinge gegenseitig, wie wir bereits in Art. 468 erwähnten. Ferner haben wir gesehen (Art. 510), dass ein Stromleiter mit einer bestimmten Selbstinduktion und Kapazität und von einem gewissen Widerstande das Bestreben hat, elektrische Oscillation von bestimmter Frequenz auszuführen. Wird derselbe in ein Medium gebracht, durch welches elektrische Wellen derselben Frequenz in einer solchen Richtung hindurch gehen, dass die elektrischen und elektromagnetischen Felder der auf einander folgenden Wellen Ströme in demselben induzieren können, so giebt jede Welle den sofort erregten Oscillationen einen kleinen Impuls, so dass dieselben stärker werden, gerade so wie ein Pendel kräftiger schwingt, wenn man ihm im richtigen Augenblick einen kleinen Stoss erteilt. Der folgende schöne Versuch von Oliver Lodge veranschaulicht diese Erscheinung der *Resonanz,* sowie die Erzeugung von Wellen durch eine oscillatorische Entladung. Zwei Leydener Flaschen (Fig. 277) werden in geringer Entfernung von einander aufgestellt. Die eine derselben wird durch eine Influenzmaschine geladen und mit einem gebogenen Drahte versehen, der als entladender Stromkreis dienen soll, mit einer Funkenlücke *S* zwischen den polierten Knöpfen am obern Ende. Die zweite

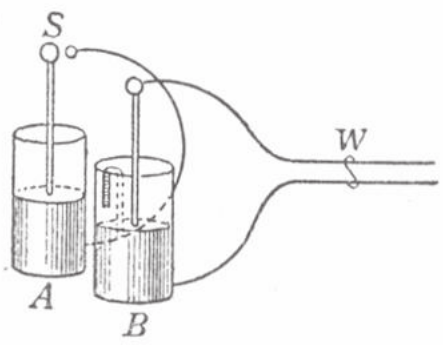


Fig. 277.

Flasche ist mit einem Stromleiter versehen, dessen Selbstinduktion durch Hin- und Herschieben eines Verbindungsstückes *W* reguliert werden kann. Von der innern Belegung führt ein Streifen Zinnfolie über den Rand dieser Flasche, ohne jedoch die äussere Belegung vollständig zu berühren. Jedesmal, wenn ein Funke bei *S* überspringt, so entstehen in dem Stromkreise von *B* Wellen, infolge dessen sich die Flasche entladet und am Ende des Streifens ein Funken entsteht.

LV. VORLESUNG: *Elektromagnetische Theorie des Lichtes.*

513. Maxwell's Theorie. Im Jahre 1867 stellte Maxwell die Theorie auf, dass die Lichtwellen nicht bloss mechanische Bewegungen des Aethers sind, sondern elektrische Undulationen. Letztere sind teils elektrischer, teils magnetischer Natur, indem die oscillierenden elektrischen Verschiebungen oscillierende magnetische Felder zur Folge haben, welche rechtwinklig zu ihnen sind, während die Richtung der Fortpflanzung der Welle auf beiden rechtwinklig steht. Nach dieser Theorie rühren alle Erscheinungen des Elektromagnetismus und des Lichtes von gewissen Bewegungszuständen im Aether her, und zwar die elektrischen und magnetischen Erscheinungen von Strömungen oder Wirbeln oder andern körperlichen Bewegungen des Aethers, die Erscheinungen des Lichtes dagegen von hin- und hergehenden Schwingungen desselben.

Eine elektrische Verschiebung erzeugt beim Entstehen oder Verschwinden eine magnetische Kraft, welche rechtwinklig zu derselben ist; sie erzeugt auch (durch die besondere als Induktion bekannte Erscheinung) eine elektrische Kraft, welche sich rechtwinklig sowohl zur elektrischen Verschiebung als auch zur magnetischen Kraft fortpflanzt. Nun wissen wir, dass bei der Fortpflanzung des Lichtes die wirklichen Verschiebungen oder Vibrationen, welche den sogenannten Lichtstrahl ausmachen, in Richtungen vor sich gehen, welche rechtwinklig zur Fortpflanzung sind. Diese Analogie ist in der Theorie ein wichtiger

Punkt und legt unmittelbar die Frage nahe, ob die bezüglichen Fortpflanzungsgeschwindigkeiten dieselben sind. Nun ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Induktion diejenige Geschwindigkeit v, welche, wie in Art. 354 gezeigt wurde, das Verhältnis der elektrostatischen zu den elektromagnetischen Einheiten darstellt und welche (für Luft) zu

$$2{,}9857 \cdot 10^{10} \text{ Zentimeter pro Sekunde}$$

angenommen wird. Und die Geschwindigkeit des Lichtes (in der Luft) ist wiederholt gemessen worden (von Fizeau, Cornu, Michelson u. a.) und hat den Näherungswert:

$$2{,}9992 \cdot 10^{10} \text{ Zentimeter pro Sekunde.}$$

Aus den Gleichungen für die Fortpflanzung einer Störung in einem elektromagnetischen Medium berechnete Maxwell die Geschwindigkeit auf $1 : \sqrt{k\mu}$, wo k den dielektrischen Koeffizienten (Art. 290) und μ die Permeabilität des Mediums bedeutet. Wie wir gesehen haben, tritt obiger Ausdruck in dem Verhältnis der Einheiten auf (Art. 355) und lässt sich aus denselben berechnen. Daraus folgt, dass die Geschwindigkeiten in Bezug auf zwei durchsichtige Media von gleicher Permeabilität, aber ungleichen dielektrischen Kapazitäten umgekehrt proportional zu $\sqrt{k}$ sein müssten. Nun ist das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten in ihnen der Brechungsexponent. Wenn demnach die Maxwell'sche Theorie richtig ist, so müsste die dielektrische Kapazität für gewöhnliche durchsichtige Medien gleich dem Quadrate des Brechungsexponenten sein. Gordon, Boltzmann und Andere haben Versuche angestellt, welche die angenäherte Richtigkeit dieser Behauptungen für Wellen von bedeutender Länge erweisen. Die Werte finden sich in folgender Tabelle. Für Gase ist die Uebereinstimmung eine noch grössere.

	k	μ^2
Flint-Glas	3,162	2,796
Schwefelkohlenstoff	1,812	2,606
Schwefel (gewöhnlicher) . . .	4,151	4,024
Paraffin	2,32	2,33

Eine andere Konsequenz der Theorie ist die, dass alle Leiter der Elektrizität für Licht undurchsichtig sein müssen, da sie die Energie der in ihnen hervorgerufenen Ströme verbrauchen. Metallische Konduktoren sind es auch, ausgenommen in sehr dünnen Schichten. Die elektrolytischen Flüssigkeiten sind jedoch durchsichtig, da der Mechanismus ihrer Leitung ein anderer ist (Art. 485). Bei einigen krystallinischen Körpern, welche die Elektrizität in einer Richtung besser leiten als in einer andern, ist die Undurchsichtigkeit für Licht dementsprechend verschieden. Farbige Turmalinkrystalle leiten die Elektrizität besser rechtwinklig zur Längsachse des Krystalls, als in dieser Achse selbst. Solche Krystalle sind bei weitem undurchsichtiger für solches Licht, welches längs der Achse durch den Krystall geht, als für solches, welches rechtwinklig zur Achse hindurchgeht. Und in dem Falle, wo die Strahlen rechtwinklig zur Achse durch den Krystall hindurchgehen, werden die Schwingungen senkrecht zur Achse vollständiger absorbiert, als diejenigen, welche parallel zur Achse sind. Daraus folgt, dass das durchgehende Licht polarisiert wird.

514. Energie-Pfade. Aus Maxwell's Gleichungen zog Poynting im Jahre 1883 die Folgerung, dass überall, wo in einem elektrischen Systeme Energie übertragen wird, dieselbe parallel sowohl zu den elektrischen als auch zu den magnetischen Oberflächen gleichen Potentials fliesst. Das, was wir einen elektrischen Strom in einem Drahte nennen, ist nichts weiter als eine Uebertragung der Energie durch einen unsichtbaren Mechanismus in dem Medium ausserhalb des Drahtes. Da wo in dem Drahte ein Widerstand vorhanden ist, welcher Energie verbraucht, indem er sie in Wärme umsetzt, strömt *seitlich* aus dem Medium Energie zu. Nach dieser Auffassungsweise hat der Draht nur den Zweck, das ausserhalb vor sich gehende Strömen der Energie zu leiten [1]). Wenn ein Strom abgesandt wird, so wissen wir, dass viel Energie dazu verbraucht wird, um den Konduktor

1) Vergl. Oliver Lodge, Moderne Anschauungen über Elektrizität.

herum ein magnetisches Feld zu erzeugen, denn der dazu verbrauchte Betrag beträgt $\frac{1}{2}LC^2$ (Art. 453). Wird der Schliessungsbogen unterbrochen, so strömt diese Energie seitlich in den Draht ein und veranlasst die sogenannten Extrastrom-Funken. Nach Poynting's Auffassungsweise, welche unabhängig von Heaviside weiter ausgebildet wurde, strömt die ganze Energie in ähnlicher Weise ein. Bei der Uebertragung der Energie in einem Wechselstrom-Transformator von den Spulen der primären Leitung zu denen der sekundären strömt die Energie offenbar *seitlich* in die Kupferdrähte, und ebenso in die Eisendrähte des Kerns, obgleich letzteres nicht so einleuchtend ist.

515. Untersuchungen von Hertz. Im Jahre 1888 fand Hertz die überzeugendsten Beweise für die Maxwell'sche Theorie, und zwar auf experimentellem Wege. Es gelang ihm nämlich, elektromagnetische Wellen derart zu erzeugen, dass er ihre Fortpflanzung im Raume untersuchen konnte. Er wies nach, dass diese Wellen, obgleich bedeutend grösser als gewöhnliche Lichtwellen, doch dieselben Eigenschaften besitzen, sich mit derselben Geschwindigkeit fortpflanzen, dass sie zurückgeworfen, gebrochen, polarisiert werden können u. s. w.

Ueber die Fähigkeit der oscillatorischen Entladungen, in dem umgebenden Raume Störungen zu verbreiten, war bereits Einiges bekannt. Henry hatte gezeigt, dass sie in entfernten leitenden Stromkreisen Funken erzeugen. Man hatte entdeckt [1]), dass in dem erregenden Stromkreise eine Funken-Lücke vorhanden sein musste. Fitzgerald hatte schliesslich den Vorschlag gemacht, Wellen durch die oscillatorischen Entladungen kleiner Kondensatoren zu erregen. Aber keiner hatte systematisch die Erscheinungen über die Fortpflanzung der Wellen verfolgt.

Hertz verwandte zur Erzeugung der Wellen einen Apparat, den er *Oscillator* nannte (Fig. 278) und der aus zwei metallischen Konduktoren (Kugel oder Scheiben) besteht, die durch einen Metallstab mit einander verbunden sind. In der Mitte desselben

1) Vergl. des Verfassers Abhandlung im Philosophical Magazine, September 1876.

befindet sich eine Funken-Lücke zwischen zwei gut polierten Knöpfen. Um nun die Wellen in der Ferne zu entdecken, gebrauchte er einen *Resonator* (Fig. 279), ein kreis- oder quadrat-

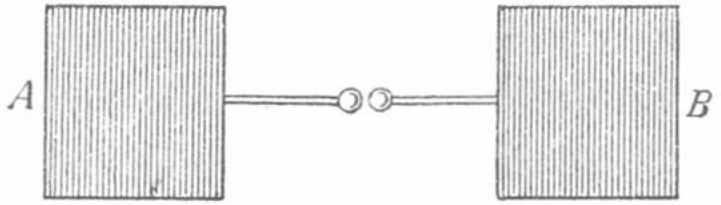


Fig. 278.

Fig. 279.

förmiges Drahtstück mit einer eine genaue Einstellung ermöglichenden Funken-Lücke. Bei einem Versuche bestand der Oscillator aus zwei Zinkplatten *A* und *B* (Fig. 278), 40 cm lang, 60 cm von einander entfernt, mit starken Kupferdrähten, die zu einer Funken-Lücke zwischen glänzend polierten Messingknöpfen führten. Eine Unterlage aus trockenem Holz war ein genügender Isolator. Der dazu passende Resonator war ein Kreis von 35 cm Radius. Um mit diesem Apparat zu experimentieren, wird der Oscillator mit einem kleinen Induktorium verbunden (Fig. 280).

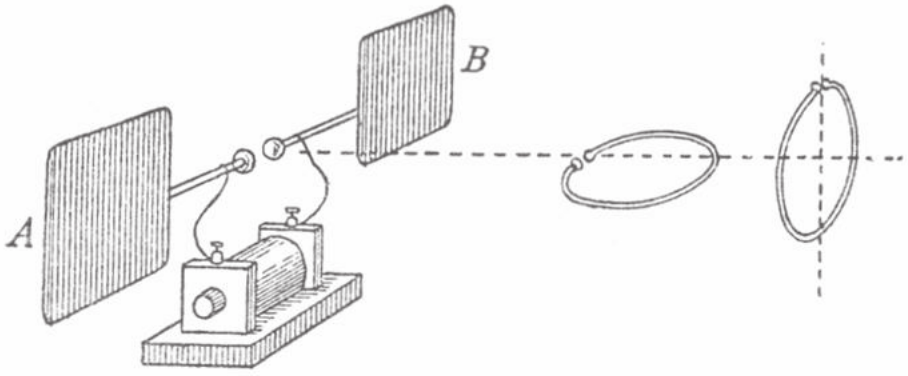


Fig. 280.

Springt ein Funke längs der Lücke über, so stellt derselbe eine vorübergehende leitende Bahn für die folgenden Wellen her. Denn ein Stromstoss von links nach rechts überladet die auf der rechten Seite befindliche Platte, und es erfolgt daher rückwärts ein Strom von rechts nach links u. s. w. Jeder von der Rolle durch die Lücke gesandte Funken besteht aus einigen Dutzend Oscillationen, von denen jede weniger als 0,00000001 Sekunde dauert, denn die Periode richtet sich (Art. 510) nach der

Kapazität und der Selbstinduktion des Apparates, und die Entladungen erfolgen rückwärts und vorwärts von *A* nach *B*, bis sie allmählich aufhören (Fig. 276). Die horizontale Linie in Fig. 280 möge die *Basis* heissen und die Linie *AB* möge die Linie der Oscillation genannt werden. Wird nun der Resonator in einer Entfernung von 1 bis 2 m vom Oscillator so aufgestellt, dass sein Zentrum auf die Basis fällt, und giebt man demselben dann verschiedene Stellungen, so beobachtet man verschiedene Wirkungen. Wird der Resonator vertikal aufgestellt, so beobachtet man keine Funken an demselben, gleichviel, wo sich die Lücke in dem Kreise befindet. Wird derselbe aber horizontal aufgestellt, so springen Funken zwischen den Knöpfen des Resonators über. Dieselben sind am glänzendsten, wenn die Lücke dem Oscillator möglichst nahe liegt, so dass der induzierte Funken dem primären Funken parallell geht. Wird dann der Resonator nach dem Oscillator bewegt, so beobachtet man Funken, falls die Lücke an der Spitze des Kreises liegt, oder diametral gegenüber, so dass also die Funken dem primären Funken parallel gehen; dagegen sind keine Funken, wenn die Lücke an der Seite liegt. Der primäre Funken induziert keine Funken rechtwinklig zu sich selbst.

Die Reflexion der elektrischen Wellen beobachtete man auf verschiedene Weise. Wenn dem Oscillator (Fig. 278) gegenüber eine grosse Metallplatte als Reflektor aufgestellt wird, um die Wellen zurückzuwerfen, welche sich längs der Basis ausbreiten, so entstehen stationäre Knotenpunkte in regelmässigen Intervallen. Wird der Resonator mit der Breitseite so aufgestellt, dass seine Lücke sich an der höchsten Stelle befindet, und wird derselbe dann längs der Basis fortbewegt bis dicht an den Reflektor, so beobachtet man in dieser Stellung keine Funken. Wird derselbe aber langsam von der Scheibe wegbewegt, so erscheinen Funken, erreichen ein Maximum und verschwinden dann wieder, sobald der erste Knotenpunkt erreicht ist, circa 180 cm vom Reflektor entfernt. Wird dieser Knotenpunkt überschritten, so erscheinen die Funken von neuem, wobei in gleichen

Intervallen längs der Basis andere Knotenpunkte erscheinen. Mittelst grosser parabolischer Spiegel zeigte Hertz, dass diese elektrischen Wellen reflektiert werden können und sich in einem Brennpunkte vereinigen lassen, ebenso wie Lichtwellen. Auch die Refraktion mittelst eines Prismas von Pech wies Hertz nach, sowie die Polarisation mittelst eines Gitters paralleler Drähte.

Später zeigte Tesla, dass man bei den Hertz'schen Versuchen bedeutend grössere Wirkungen erzielt, wenn man den Funken plötzlicher erscheinen lässt, durch Anwendung eines magnetischen Feldes, welches ihn auslöscht. Elihu Thomson benutzt zu demselben Zwecke eine Gebläsevorrichtung senkrecht zur Funken-Lücke.

516. Anzeiger für elektrische Wellen. Der Hertz'sche Resonator mit Funken-Lücke ist nicht der einzige Apparat, welcher elektrische Wellen anzeigt. Ein präparierter Froschschenkel (Art. 250) kann statt einer Funken-Lücke benutzt werden. Eine empfindliche Vakuum-Röhre ist ebenfalls ein guter Anzeiger, besonders in Verbindung mit einer Batterie von einigen hundert kleinen Elementen, welche allein nicht im Stande sind, einen Funken zu geben. Elektrometer, dünne Drähte, welche infolge der Erwärmung durch induzierte Ströme sich auszudehnen im Stande sind, gehören ebenfalls hierher. Die beste Methode benutzt eine von Lodge erfundene Vorrichtung, eine zum Teil mit groben Eisenfeilspänen gefüllte Röhre, die mit einem Galvanometer und einem einfachen Elemente zu einem Schliessungskreise verbunden ist. Der Widerstand der Späne ist sehr gross, und daher fliesst nur ein schwacher Strom, bis eine elektrische Welle gegen die Röhre anstösst, und dadurch die Späne sofort leitend macht (vergl. Art. 395, über die Leitungsfähigkeit gepulverter Körper). Durch leise Berührung der Röhre kehren die Späne wieder in ihre frühere Lage zurück. Bei Benutzung eines solchen Anzeigers und eines Oscillators, der mit einem sorgfältig polierten Messingknopf zwischen zwei kleinern Knöpfen versehen ist, wies Lodge nach, dass diese elektrischen Wellen sich einige hundert Meter weit durch die Mauern von Häusern fortpflanzen können. Dabei

muss dafür Sorge getragen werden, die Wirkungen abspringender Funken durch Metallschirme zu verhüten.

517. Eigenschaften der elektrischen Wellen. Die allgemeine Gleichung, welche zwischen der Wellenlänge λ, der Fortpflanzungsgeschwindigkeit v und der Frequenz (Schwingungszahl) n stattfindet, lautet: $v = n \cdot \lambda$. Setzen wir $v = 3 \cdot 10^{10}$ (cm pro Sekunde) als Geschwindigkeit des Lichtes (in der Luft) und nehmen 0,000076 als Länge der roten Wellen (der längsten unter allen sichtbaren), so folgt, dass die Schwingungszahl derselben nicht weniger als $395 \cdot 10^{12}$ sein kann. Die durch elektrische Oscillationen erzeugten Wellen haben eine bedeutend geringere Frequenz und ihre Wellenlänge ist dementsprechend grösser. Letztere hängt von der Grösse des als Oscillator benutzten Apparates ab, ebenso wie der Ton eines am Ende angeschlagenen eisernen Cylinders von der Länge desselben abhängt. Besteht der Oscillator aus einem Drahte, der an beiden Enden eine geringe Kapazität besitzt, so beträgt die Länge der erzeugten Wellen das Doppelte der Drahtlänge. Die Länge der von einer Kugel (Fig. 281) herrührenden Wellen beträgt $2\pi d : \sqrt{3} = 3{,}6\, d$, wo d der Durchmesser der Kugel ist, aber sie hören nach etwa einer Vibration auf. Wird eine Funken-Lücke zwischen zwei Knöpfen quer zum Durchmesser eines hohlen Cylinders angebracht, so ist die Länge der vom Ende des Cylinders ausgehenden Wellen ungefähr gleich seinem Durchmesser, und es erfolgen zahlreiche Vibrationen, bevor die ganze Energie ausgestrahlt ist. Bei Anwendung eines symmetrischen Paares sorgfältig abgepasster Kondensatoren hat Ebert Oscillationen bis zu 20,000 Perioden erzielt.

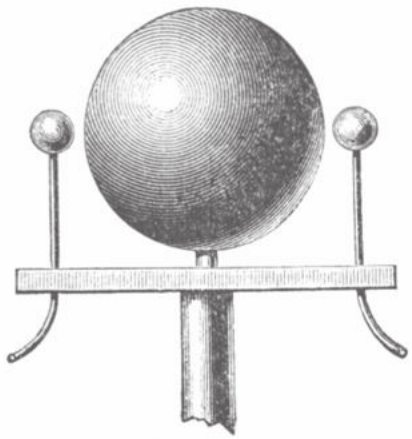


Fig. 281.

Die Ströme, welche in Drähten durch Oscillationen von so hoher Frequenz erzeugt werden, sind Oberflächen-Ströme (Art. 471), da der innere Teil des Drahtes frei ist. Für solche Ströme be-

trägt daher der Widerstand eines starken Kupferdrahtes unter Umständen mehrere Millionen Ohm. Einen Beweis hierfür liefert die Tendenz der *seitlichen Entladung*. Dies lässt sich dadurch zeigen, dass man die Leydener Flaschen einer Influenzmaschine durch einen starken Kupferdraht verbindet, der die in Fig. 282 angegebene Gestalt hat. Findet zwischen den Knöpfen eine Entladung statt, so wird zwischen den äussern Belegungen ein oscillatorischer Strom ins Leben gerufen, welcher nicht längs des Metalldrahtes fliesst, sondern vielmehr als Funke zwischen den einander am nächsten liegenden Teilen überspringt. Das Bestreben des Blitzes, seitliche Entladungen zu erzeugen, ist nach Oliver Lodge eine Folge des oscillatorischen Charakters des Lichtblitzes.

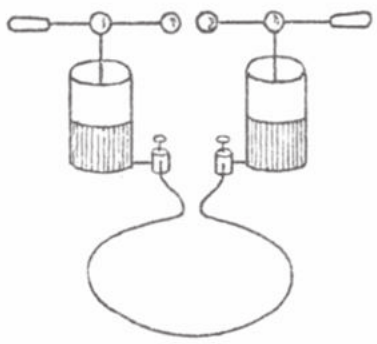


Fig. 282.

518. Fortpflanzung der Wellen in Drähten. Wird in das eine Ende eines langen Drahtes ein oscillatorischer Funke geschickt, so hat während der Zeit, wo die zweite Schwingung ihr Maximum erreicht, die erste einen gewissen Weg zurückgelegt, welchen wir die Wellenlänge der Bewegung nennen können. Nach Maxwell's Theorie ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit gleich der des Lichtes, indem die Energie in Wirklichkeit sich durch die Luft fortpflanzt, und seitlich in den Draht übergeht. Aus dem Versuche ergiebt sich, dass die Geschwindigkeit einer von einem Drahte geleiteten Welle gleich der einer in der Luft sich ausbreitenden Welle ist. Dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von der Dicke oder dem Material des Drahtes unabhängig ist, hat v. Bezold im Jahre 1870 mittelst der in Fig. 283 abgebildeten Vorrichtung bewiesen. Durch einen Draht wird bei G eine oscillatorische Entladung in einen rechteckförmigen Stromleiter $ABCD$ geschickt, der in der Mitte zwischen B und D eine Funken-Lücke PQ hat. Liegt G in der Mitte zwischen A und C, so werden offenbar die Impulse gleichzeitig bei P und Q anlangen, falls beide Seiten

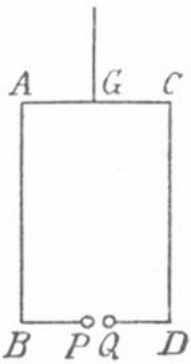


Fig. 283.

des Systems einander gleich sind; dann tritt kein Funke auf. Besteht eine Seite *CD*, aus Eisen, und die andere *AB* aus Kupfer, so muss gleichfalls, wenn kein Funke überspringen soll, die Entladung genau in der Mitte bei *G* hineingeschickt werden.

LVI. VORLESUNG: *Weitere Beziehungen zwischen Licht und Elektrizität.*

519. Elektro-optische Erscheinungen. In neuerer Zeit hat man verschiedene wichtige Relationen zwischen Licht und Elektrizität beobachtet. Dieselben lassen sich in folgender Weise klassifizieren.

1) Erzeugung von Doppelbrechung durch dielektrische Spannung.

2) Drehung der Polarisationsebene einer Lichtwelle beim Durchgange durch ein durchsichtiges Medium, welches sich innerhalb eines magnetischen Feldes befindet, oder durch Reflexion an der Oberfläche eines Magnets.

3) Aenderung des elektrischen Widerstandes, beobachtet am Selen und andern Körpern, welche dem Lichte ausgesetzt wurden.

4) Photochemische Erregung elektromotorischer Kräfte.

5) Relation zwischen dem Brechungsexponenten und der dielektrischen Kapazität durchsichtiger Körper.

6) Elektrische Wirkung des ultra-violetten Lichtes.

Somerville, Zantedeschi und Andere stellten die Behauptung auf, dass man Stahlnadeln dadurch magnetisieren könne, dass man Teile derselben der Einwirkung violetter und ultravioletter Lichtstrahlen aussetzt; ihre Beobachtungen beruhten jedoch auf Irrtum.

Bidwell hat gefunden, dass Licht, welches auf ein eben entmagnetisiertes Stück Eisen auffällt, ein augenblickliches Wiederentstehen des Magnetismus hervorruft.

520. Elektrostatisch-optische Spannung. Im Jahre 1875 machte Dr. Kerr in Glasgow die Entdeckung, dass Glas,

welches einer starken elektrostatischen Spannung unterworfen wird, eine wirkliche Spannung erleidet, die mit Hilfe eines polarisierten Lichtstrahls beobachtet werden kann. Bei dem ersten Versuche wurden zwei Drähte in zwei in eine Glasplatte gebohrten Oeffnungen befestigt, jedoch so, dass sie sich nicht ganz berührten; wurden sie dann mit den Enden einer Induktionsspule oder einer Influenzmaschine verbunden, so veranlassten die sich auf den Drähten ansammelnden Ladungen in dem dazwischen befindlichen dielektrischen Körper eine elektrostatische Spannung längs der elektrischen Kraftlinien. Wurde die Platte zwischen zwei Nicol'sche Prismen, einen Polarisator und einen Analysator [1]), gebracht, so zeigte sie Doppelbrechung, als wenn sie einem Zuge unterworfen gewesen wäre und sich längs der Richtung der elektrischen Kraft ausgedehnt hätte. Schwefelkohlenstoff und andere isolierende Flüssigkeiten weisen ähnliche Erscheinungen auf; dagegen zeigen fettige Oele tierischen und pflanzlichen Ursprungs eine Beeinflussung der entgegengesetzten Art, als wenn sie sich in der Richtung der elektrischen Linien zusammenzögen. Es ergiebt sich, dass die Differenz der Verzögerung zwischen dem ordentlichen und dem ausserordentlichen Lichtstrahle pro Dickeneinheit des dielektrischen Körpers *dem Quadrate der resultierenden elektrischen Kraft proportional* ist. Die Achse der doppelten Brechung hat die Richtung der elektrischen Kraft. Quincke hat nachgewiesen, dass diese Erscheinungen sich mit Hilfe elektrostatischer Ausdehnungen und Zusammenziehungen (Art. 295) erklären lassen.

521. Magneto-optische Drehung der Polarisationsebene eines Lichtstrahls. Im Jahre 1845 machte Faraday die Entdeckung, dass ein in einer bestimmten Ebene polarisierter Lichtstrahl durch die Einwirkung eines Magnets gedreht werden

---

1) Ein Lichtstrahl heisst polarisiert, wenn die Schwingungen in derselben Ebene stattfinden. Gewöhnliches Licht lässt sich in diesen Zustand dadurch überführen, dass man es durch einen geeigneten Polarisationsapparat hindurchgehen lässt (wie z. B. durch ein Nicol'sches Prisma oder eine dünne Scheibe aus Turmalin u. s. w.).

kann, so dass die Schwingungen in einer andern Ebene ausgeführt werden. Die Ebene, in der ein Lichtstrahl polarisiert ist, lässt sich dadurch bestimmen, dass man denselben durch ein zweites Nicol'sches Prisma (oder Turmalin) beobachtet, denn jeder Polarisator ist undurchsichtig für solche Strahlen, deren Polarisationsebene rechtwinklig zu seiner eigenen ist. Faraday liess einen polarisierten Strahl durch ein Stück »Flintglas« hindurchgehen (hauptsächlich aus borsaurem Blei bestehend), welches sich in einem kräftigen magnetischen Felde, zwischen den Polen eines grossen Elektromagnets, befand, durch dessen Spiralen man einen Strom senden konnte. In den Weg des austretenden Lichtstrahls wurde als Analysator ein zweites Nicol'sches Prisma gebracht, welches so lange gedreht worden war, bis alles Licht ausgelöscht war. In dieser Lage war seine eigene Symmetrie-Ebene rechtwinklig zur Polarisationsebene des Lichtstrahls. Wurde der Stromleiter geschlossen, so bemerkte man sofort Licht durch das analysierende Nicol'sche Prisma, ein Beweis, dass der Lichtstrahl in eine neue Lage gedreht worden war, in welcher seine Polarisationsebene nicht mehr rechtwinklig zur Symmetrie-Ebene des Analysators war. Wurde jedoch das analysierende Nicol'sche Prisma selbst gedreht, so konnte man eine neue Lage ausfindig machen, (rechtwinklig zur Polarisationsebene des Lichtstrahls), in welcher das Licht von neuem ausgelöscht wurde. *Die Richtung der magneto-optischen Drehung der Polarisationsebene stimmt* (für diamagnetische Media) *mit der Richtung des den Magnetismus erzeugenden Stromes überein.* Verdet entdeckte das wichtige Gesetz, dass für eine gegebene Substanz *die Grösse der Drehung der magnetischen Kraft H proportional ist.* Für den Fall, wo die Strahlen nicht in der Richtung der Kraftlinien gehen, ist die Grösse der Drehung *dem cosinus des Winkels β zwischen der Richtung des Strahls und den Kraftlinien proportional.* Auch ist die Drehung *der Länge l desjenigen Körpers proportional, durch welchen die Strahlen hindurchgehen.* Diese Gesetze lassen sich durch die Gleichung ausdrücken:

$$\Theta = w \,.\, H \,.\, \cos\beta \,.\, l,$$

wo w eine Konstante ist, welche das spezifische magnetische Drehungsvermögen des gegebenen Körpers darstellt und unter dem Namen: *Verdet's Konstante* bekannt ist. Nun ist $H . \cos\beta . l$ die Differenz des magnetischen Potentials zwischen dem Punkte A, wo der Lichtstrahl in das Medium eintritt und dem Punkte B, wo er dasselbe verlässt. Daher ist

$$w = \Theta : (V_B - V_A).$$

Der Wert von Verdet's Konstante für gelbes Natriumlicht bei 18° C ist sorgfältig bestimmt worden. Derselbe beträgt für Schwefelkohlenstoff $1{,}222 . 10^{-5}$, für Wasser $0{,}375 . 10^{-5}$, für Flintglas $2{,}132 . 10^{-5}$. Für diamagnetische Substanzen ist die Konstante gewöhnlich positiv, negativ dagegen für viele magnetische Körper, wie z. B. für Lösungen von Eisenchlor (d. h. bei diesen Körpern ist die Drehung dem magnetisierenden Strome entgegengesetzt gerichtet). Die von Hall (Art. 392) entdeckte Erscheinung scheint mit derjenigen der magneto-optischen Drehung in engem Zusammenhange zu stehen. Für verschieden gefärbtes Licht ist die Drehung nicht dieselbe, sondern ist annähernd dem Quadrate der Wellenlänge umgekehrt proportional.

Auch Gase erzeugen in einem magnetischen Felde eine Drehung der Polarisationsebene des Lichtes in verschieden hohem Grade; Kohlenoxyd und Kohlensäure wirken kräftiger als Luft oder Wasserstoff; Sauerstoff und Ozon sind negativ. Die Drehung ist in allen Fällen sehr gering und ist stets der Menge des Gases proportional, welche der Lichtstrahl durchsetzt hat. H. Becquerel hat gezeigt, dass die Ebene der natürlichen Polarisation des Himmels nicht mit der Ebene der Sonne zusammenfällt, sondern durch den Einfluss des Erdmagnetismus um einen Winkel gedreht wird, welcher im Maximum auf dem magnetischen Meridian den Wert von 59 Bogenminuten erreicht.

Wir haben gesehen (Art. 126, 392, 393), welchen Grund wir zu der Annahme haben, dass der Magnetismus eine Rotationserscheinung ist, wobei ein *gewisses etwas* um eine in der Richtung der Magnetisierung liegende Achse rotiert. Diese Theorie würde die Drehung der Polarisationsebene eines Lichtstrahls erklären,

welcher durch ein magnetisches Feld hindurchgeht. Denn wir können uns vorstellen, dass ein planpolarisierter Lichtstrahl aus einem paar (entgegengesetzt) zirkular-polarisierter Wellen besteht, wobei der nach rechts gerichteten Drehung in dem einen Strahle eine gleiche nach links gerichtete Drehung in dem andern Strahle periodisch das Gleichgewicht hält; und würde eine solche Bewegung einem Medium mitgeteilt, in welchem eine Rotation in derselben Richtung bestände (wie eine solche in jedem magnetischen Felde statt hat), so würde der eine dieser zirkular-polarisierten Strahlen beschleunigt und der andere verzögert werden, so dass, falls sie wieder zu einem einzigen planpolarisierten Strahle vereinigt würden, diese Ebene nicht mit der ursprünglichen Polarisationsebene zusammenfallen würde, sondern offenbar um einen Winkel gedreht wäre, welcher der hinzutretenden Rotation proportional ist.

522. Kerr's Theorem. Im Jahre 1877 wies Dr. Kerr nach, dass ein polarisierter Lichtstrahl auch bei der *Reflexion an der Oberfläche eines Magnets oder Elektromagnets* gedreht wird. Findet die Reflexion an einem Pole statt, so dreht sich die Polarisationsebene nach der entgegengesetzten Richtung, nach welcher der magnetisierende Strom fliesst. Wird das Licht in einem seitlichen Punkte des Magnets reflektiert, so findet die Rotation in der Richtung des magnetisierenden Stromes statt, falls die Polarisationsebene der Einfallsebene parallel ist; stehen jedoch beide Ebenen senkrecht auf einander, so findet die Rotation nur dann in jener Richtung statt, wenn der Einfallswinkel grösser als 75^0 ist, bei kleineren Winkeln dagegen in der entgegengesetzten Richtung.

523. Kundt's Theorem. Kundt machte die Beobachtung, dass die Polarisationsebene der Lichtwellen auch dann rotiert, wenn das Licht durch eine dünne, noch durchsichtige Eisenscheibe geht, welche quer in einem magnetischen Felde liegt.

524. Photo-galvanische Eigenschaften des Selen. Im Jahre 1875 machte Willoughby Smith die Entdeckung, dass das Metall Selen die anormale Eigenschaft besitzt, seinen elek-

trischen Widerstand unter dem Einflusse des Lichts zu verändern. Das gewöhnliche flüssige oder glasartige Selen ist ein sehr schlechter Leiter; sein Widerstand ist annähernd $3{,}8 \cdot 10^{19}$ mal so gross wie der des Kupfers. Wird dasselbe sorgfältig ausgeglüht (dadurch, dass es mehrere Stunden lang auf einer Temperatur von 220^0 C, etwas unter seinem Schmelzpunkte, erhalten und dann langsam abgekühlt wird), so nimmt es eine krystallinische Gestalt an, in der sein elektrischer Widerstand beträchtlich reduziert wird. In letzterem Zustande ist es besonders für Licht empfänglich. Adams fand, dass grünlichgelbe Strahlen die wirksamsten sind. Er zeigte auch, dass *die Aenderung des elektrischen Widerstandes der Quadratwurzel aus der Lichtstärke direkt proportional ist*, und dass der Widerstand um so geringer ist, je grösser die E.M.K. ist. Im Jahre 1879 haben Graham Bell und Sumner Tainter »Selen-Zellen« konstruiert, bei denen das ausgeglühte Selen in schmalen Streifen zwischen den Rändern von grossen leitenden Kupferplatten sich befindet, wodurch sowohl eine Verkleinerung des Widerstandes erreicht, als auch eine grosse Oberfläche dem Lichte ausgesetzt wird. Eine Zelle z. B., deren Widerstand im Dunkeln 300 Ohm betrug, hatte im Sonnenlichte nur einen Widerstand von 150 Ohm. Diese Eigenschaft des Selens benutzten die genannten Forscher zur Konstruktion des **Photophons**, eines Instruments, welches mit Hilfe eines Lichtstrahles, der von einem dünnen, durch die menschliche Stimme in Schwingung versetzten Spiegel reflektiert wird, die Schallwellen in die Ferne überträgt; der Strahl trifft mit wechselnder Intensität auf eine Selenplatte, welche mit einer kleinen Batterie und einem Bell'schen Telephone (Art. 505) zu einem Stromkreise verbunden ist, in welchem die Töne durch die Schwankungen des Stromes reproduziert werden.

Aehnliche Eigenschaften, jedoch in schwächerem Grade, finden sich beim Tellurium. Auch Kohle ist für Licht empfindlich.

525. Photo-chemische Batterieen. Um die Mitte dieses Jahrhunderts führte Becquerel den Nachweis, dass durch zwei Silberplatten, welche mit einem frischen Niederschlage von

Silberchlorür überzogen sind, in einen Becher mit Wasser gestellt und dann mit einem Galvanometer verbunden werden, ein Strom hindurchgeht, wenn auf die eine der beiden Platten Licht auffällt, indem diese dann als Anode wirkt, und neuerdings hat Minchin die Wirksamkeit anderer photo-chemischer Kombinationen gezeigt. Einige derselben sind für elektrische Wellen von grosser Wellenlänge sehr empfindlich.

526. Photo-elektrische Entladungen. Im Jahre 1887 machte Hertz die Entdeckung, dass zwischen den Kugeln eines Entladers ein Funke schneller überspringt, wenn jener durch eine Lichtquelle beleuchtet wird, die reich an violetten und ultra-violetten Strahlen ist (Magnesiumlicht, Bogenlicht oder Induktionsfunke). Die Wirkung ist bei den einzelnen Metallen verschieden, und richtet sich nach ihrer Reinheit, der Beschaffenheit des umgebenden Gases, der Art der Ladung und der Polarisation des Lichtes. Im ultra-violetten Lichte entladet frisch poliertes Zink in der Luft schnell eine negative Ladung, aber nicht eine positive. Andererseits entladen die Superoxyde in einer Atmosphäre von Wasserstoff bei gleicher Beleuchtung schnell positive Ladungen. Die Wirkung ist stärker, wenn die Schwingungsebene der auffallenden Wellen rechtwinklig zur Oberfläche ist, weniger stark, wenn die Polarisation in einer dazu parallelen Ebene stattfindet. Die Erscheinung ist wahrscheinlich eine Folge der kleinen Lichtwellen, welche chemische Reaktionen hervorrufen, die nur bei einer Art elektrischen Austausches stattfinden (Art. 317). In einem starken magnetischen Felde finden keine derartigen Entladungen statt. Hallwachs lud reine Zinkplatten positiv, dadurch dass er sie dem ultra-violetten Lichte aussetzte.

Anmerkung zu Art. 316

(vom Uebersetzer).

Röntgen beobachtete, dass, wenn die Kathodenstrahlen im Innern einer Röhre auf einen festen Körper treffen (Glaswand, eine im Innern angebrachte Platinscheibe etc.), von der getroffenen Stelle eine neue Art von Strahlen ausgeht (*X*-Strahlen, Röntgenstrahlen). Dieselben haben folgende bemerkenswerte Eigenschaften:

1) Sie vermögen durch die Glaswand der Röhre hindurch in den umgebenden Raum zu treten.

2) Treffen sie hier auf einen geladenen Körper, so wird derselbe entladen.

3) Die Strahlen vermögen gasförmige, flüssige und feste Körper zu durchdringen und zwar um so leichter, je geringer die Dichte der Substanz ist. Während eine Bleiplatte (Dichte = 11,3) von etwa 3 mm Dicke so gut wie undurchlässig ist, lassen viel dickere Aluminiumplatten (Dichte = 2,6) oder Holzklötze (Dichte: 0,5 bis 0,7) noch die Strahlen z. T. hindurch.

4) Die Strahlen vermögen lebhafte Phosphoreszenz zu erregen und sind photographisch wirksam.

Auf den unter 3) und 4) angeführten Eigenschaften beruht die Möglichkeit, die Strahlen zur Durchleuchtung des menschlichen Körpers zu verwenden. Lässt man die Strahlen auf einen mit Bariumplatincyanür bedeckten Papierschirm fallen, so erscheint der Schirm hell leuchtend. Bringt man jetzt einen Körper, z. B. die Hand, zwischen die Ausgangsstelle der Röntgenstrahlen und den Schirm, so erscheint auf dem hellen Grunde desselben ein Schattenbild der Hand, in welchem sich die Um-

risse der Knochen als dunklere Stellen von den weniger dunklen Schattenbildern der Fleischteile unterscheiden, so dass man das Knochengerüst genau erkennen und etwa vorhandene Verletzungen feststellen kann. Benutzt man statt des phosphoreszierenden Schirmes eine photographische Platte, so erhält man eine Photographie.

NAMEN- UND SACH-REGISTER.

NB. Die Zahlen geben die Paragraphen an!

Aal, elektrischer 76.
Ablenkung, Methode der — 131. 136.
Abnahme der Spannung in Hauptleitungen 407. 442.
Abstossung s. Anziehung.
Aenderung der Deklination und Inklination.
— geographische 146. 149.
— säkulare 150.
— tägliche 151.
— jährliche 152.
— des elektrischen Zustandes der Atmosphäre 330.
Aequator, magnetischer 86.
Aequivalente, elektrochemische 235.
Aether 1. 7. 64. 512.
Akkumulator 441. 487.
Aldini 250.
Aluminium, Gewinnung des — 489.
Aluminiumfenster 316.
Amalgam, elektrisches 44.
— von Ammonium, Natrium etc. 485.
Amalgamierung von Zinkplatten 169.
Ammeter 216.
Amöben 251.
Ampère 385. 386. 387. 393. 492.
Ampère, das 157. 202. 349.
Ampère's Gestell 386.
Ampère'sche Regel 192. 377.
Ampère-Windungen 336. 372.
Ampèrometer 216.
Amplitude der E.M.K. 465.
Anelektrische Körper 3.
Animalische Elektrizität 76. 252.
Anion 234, 486.
Anode 165. 231.
Anziehung und Abstossung
— elektrischer Körper 2. 4. 22. 24. 47. 74. 257.
— der Ströme 333. 384. 389.
— der Magnete 84. 88. 121. 332. 384.
Arago 197. 326. 376. 452.
Arbeit des Wechselstromes 470.
— eines Konduktors 334.
Armatur des Magnets 103.
Armatur der Dynamomaschinen 457.
Armstrong 48.
Astatische Magnetnadeln 196.
Atmosphärische Elektrizität 72. 323.
Atomladung 486 Anm.
Auslader s. Entlader.
Ausscheidung von Metallen 485. 489.
Ayrton und Perry 80. 216. 293. 354. 453.
Azimuth-Kompass 149. 151.

B. A. Einheit 353.
Bain 241.
Bancalari 369.
Barrett 124.
Batterieen von Leydener Flaschen 62.
— Volta'sche 163. 174. 184. 188.
— Versagen der — 167.
— sekundäre 487.
Beccaria 246. 328.
Becherapparat 160.
Becquerel, A. 329. 364.
—, E. 525.
—, H. 521.
Belege 50.
Bell 505. 509. 524.
Bennet 16. 28. 49.
Bernstein 2.
Berührungselektrizität 79. 158.
Berührung von Oberflächen 12.
Beschleunigung von Wechselströmen 467.
Bewegung im magnetischen Felde 199. 374.
Bidwell 124. 360. 379. 519.
Bifilare Aufhängung 130. 204. 283.
Bilder, elektrische 270.
Biot 33. 148. 329.
Blitz 11. 324. 326.
Blitzableiter 35. 327.
Blut, Leitungsfähigkeit des — 251.
Bogenlicht 443. 444.
Bogenlichtlampen 445.
Bogenlichtmaschinen 463.
Bolometer 399.
Boltzmann 292. 293. 513.

Boracit 74.
Bosanquet 370.
Boyle 2 Anm.
Boys 420.
Brechungsexponent 513.
Brown 481.
Bruch, als Quelle der Elektrizität 68.
Brückenmethoden 139. 406. 408 u. f.
Brugmans 364.
Brush 463.
Bruttokraft 459.
Büschelentladung 314. 319.
Bunsen 178. 184.

Cabot 146.
Cailletet 308.
Callan 178 Anm. 224.
Callaud 182.
Callender 399.
Canton 22. 44.
Cardew 425. 466.
Carhart 183.
Carré 45. 106.
Carriers 49.
Cavallo 4. 328. 492.
Cavendish 290. 291. 311.
Ceca 328.
Charakteristische Kurven 461.
Chemische Probe für schwache Ströme 241. 311.
Chemische Wirkungen
— in der Batterie 167.
— ausserhalb der Batterie 229. 482.
— der Funkenentladung 311.
Chemische Wirkungen, Gesetze über — 173. 235. 483.
Chinin 294.
Chirurgie, Anwendung der Elektrizität auf — 426.
Chromsäure 178.
Chromsäure-Element 175. 184.
Chronograph, elektrischer 504.
Clamond 420.
Clark's Normalelement 183.
Clausius 486.
Columbus 146.
Compound-Dynamo 460. 462.
Coulomb 18. 19. 38. 129. 132. 256. 265. 268.
Coulomb, das, 157. 257 Anm. 349.
Crookes 316. 322.
Cruickshank 175.
Cumming 195. 418.
Cuneus 60.
Cuthbertson 41.

Dampfelektrisiermaschine 48.
Daniell 176. 179.
Dauer des Funkens 318.
Davy, Marié 188.
Davy, H. 376. 443. 485.
Deklination, magnetische 146. 150.
Dellmann 281.
Depolarisation, mechanische 175.
— chemische 175. 177. 178.
— elektrochemische 175. 176.
Destillation, elektrische 246.
Deviation des Kompasses 144.
Dewar 111. 248. 252. 365. 399.
Diagramm, thermo-elektrisches 419.
Diamagnetismus 94. 364.
— von Flammen 369.
— von Gasen 365. 369.
Diaphragmenströme 249.
Dichte, elektrische 38. 268.
— magnetische 134. 332.
Dielektrica 10. 25. 57. 290.
Dielektrische Kapazität 257. 290—94.
Dielektrischer Koeffizient 278. 512.
Dielektrische Stärke 310.
Differential-Galvanometer 212. 406.
Dimensionen der Einheiten 351.
Direkter und umgekehrter Strom 218.
Dolbear 294. 505.
Donner 11. 326.
Doppelbrechung durch dielektrische Spannung 519. 520.
Doppelstrich 101. 102.
Drachen, elektrischer 324.
Drehstrom 480.
Drehungsmoment 136.
Drei-Draht-System 448.
Druck erzeugt Elektrizität 75.
— beeinflusst die Elektrolyse 485.
Drucktelegraphen 492.
Du Bois 358. 361.
Du Bois Reymond 252.
Duboscq 444.
Du Fay 5. 30.
Duter 295.
Durchbohrung des Glases 62.
— durch den elektrischen Funken 310.
Dynamische Elektrizität s. elektrische Ströme.

Dynamomaschinen 438. 456. 458.
Dynamometer 389.
Dyn, das 276.

Ebert 517.
Edison 239. 437. 447. 498 506.
Edlund 244.
Ei, elektrisches 227. 315.
Einheiten, absolute 348.
— magnetische 347.
— elektromagnetische 347 u. f.
— elektrostatische 278 u. f.
— fundamentale und abgeleitete 276. 277.
Einheiten, Verhältnis der elektrostatischen zu den elektromagnetischen — 278. 354.
Einheitsflasche 280.
Einheitspol, magnetischer 141. 347.
Einschränkung telegraphischer Signale 297.
Eisenkern, magnetischer 84.
Elektrisiermaschinen 42.
Elektrizität, Theorie der — 7. 322.
Elektrochemie 482.
Elektrochemische Kraft der Metalle 484.
Elektroden 231.
— unpolarisierbare 252.
Elektrodynamik 384.
Elektro-Kapillarerscheinungen 248.
Elektrolyse 232. 482.
— Gesetze der — 235. 485.
— des Wassers 231. 482.
Elektrolyse des Kupfersulphats 233.
— Theorie der — 486.
Elektrolyten 231. 482.
Elektrolytische Konvexion 486.
Elektrolytischer Kondensator 487.
Elektromagnet 107. 376. 472.
— Gesetze des — 375.
— Berechnungen des — 370 371.
Elektromagnetische Einheiten 347.
— Maschinen s. Motoren.
— Systeme 199. 374.
Elektromagnetische Theorie des Lichtes 512.
— Wellen 510.
Elektromagnetismus 332.
Elektrometallurgie 489.
Elektrometer, absolutes 282.
— Abstossungs- 281.
— mit Anziehungsscheibe 282.
Elektrometer von Dellmann 281.
— von Peltier 281. 329.
— tragbares 282.
— Quadrant- 283.
— Kapillar- 248. 287.
Elektromotoren 438. 479.
Elektromotorische Intensität 261. 278.
— Kraft 164. 217. 349. 411. 482.
Elektro-Optik 519.
Elektrophor 26. 49.
Elektroskop 14.
— von Bennet 16. 28.
— von Bohnenberger 16. 286.
— von Fechner 286.
— von Gilbert 15.
— von Hankel 286.
— von Henley 17.
— Kondensator- 79.
— mit Markkugeln 3. 4.
Elektroskopische Pulver 31. 47. 294. 319.
Elektrostatik 8. 254.
Elektrostatische optische Spannung 520.
Elektrotypographie 490.
Elemente, Volta'sche 161.
— Klassifikation der — 175.
— Aufstellung der — 187. 402.
— Tabelle der — 184.
St. Elmsfeuer 324 Anm.
Elwell-Parker 473.
Energie 1. 64.
— des magnetischen Feldes 197.
— der Ladung einer Leydener Flasche 300.
Energie des elektrischen Stromes 430.
— Zufuhr und Maß der — 430.
Energiepfade 513.
Entlader 59. 62.
Entladung durch Flammen 8. 309.
— an Spitzen 47. 314. 324.
— durch Leitung 305.
— Konvektive 47. 307.
— durch Funken 306.
— Glüh- 314. 324 Anm.
— Streifen- 315.
— durch Gase 317.
— Büschel- 314. 319.
— durch Verdunsten 246.
— oscillatorische 510.
— Grenze der — 268.
— durch Wassertropfapparate 329.
— wird durch den Magnet beeinflusst 317.

Entladung, Wirkungen der — 47. 310. 311. 312.
— Geschwindigkeit der — 318.
Entmagnetisieren 363.
Erde als Magnet 95.
— als Rückleiter benutzt 492.
— Potential der — 264.
Erdmagnetische Kraft 356.
Erdmagnetismus 95. 145. 356. 360.
Erdströme 297. 298.
Erg, das 276.
Erregende Kraft 372.
Erwärmen der Spulen 381. 424.
Everett 209 Anm. 329. 360.
Ewing 127. 358. 359.
Expansion, elektrische 295. 520.
Extrastrom 454.

Farad. das 298. 349.
Faraday 7. 25. 34. 37. 119. 173. 217. 222. 223. 235. 237. 240. 241. 291. 293. 294. 296. 308. 309. 311. 314. 364. 368. 369. 387. 388. 452. 521.
Farbe des Funkens 313.
Faure 487.
Favre 423.
Fechner 286.
Feddersen 509.
Feeders 435.
Feld, elektrisches 13. 16. 20. 22. 24. 257. 274. 294. 519. 520.
— magnetisches 115. 197. 332. 384. 457. 521.
— rotierendes 480. 481.
Feldmagnet 457. 460.
Ferromagnetische Körper 364.
Figuren, magnetische 119. 120. 121. 142. 197. 384.
— elektrische 31. 294. 319.
Flammen, Diamagnetismus der — 369.
— Entladung durch — 8. 309.
— Elektrisierung durch — 70.
Fleischfressende Pflanzen 251.
Fleming 188. 221. 399.
Flüssige Kondensatoren 487.
Flüssige Körper, als Konduktoren 229. 485. 513.
— Widerstand der — 398. 399.
Fluidum, elektrisches 7.
Flut, magnetische 142. 332. 358. 372.
Flutdichte 358 Anm.
Folgepole 117. 120. 377.
Fontana 295.
Foster 353. 410.
Foucault 224. 444.
Franklin 7. 38. 47. 55. 63. 249. 304. 312. 324. 327. 331.
Freie Elektrizität 27. 79 Anm.
Frequenz 465. 471. 510. 515.
Frölich 375.
Froment 438.
Froschschenkel 158. 250.
Funken 11. 46. 47. 48. 305. 308. 318. 324.

Galvani 158. 250. 252.
Galvani'sche Batterie s. Volta'sche Batterie.
Galvanische Elektrizität s. Elektrische Ströme.
Galvanismus s. Elektrische Ströme.
Galvanischer Geschmack 249.
Galvanometer 203.
— absolutes 208.
— aperiodisches 214.
— astatisches 196. 206. 210
— ballistisches 213. 413.
— Differential- 212. 406
— Spiegel- 210.
— Sinus- 209.
— Tangenten- 207.
— von Ayrton und Mather 211.
— von d'Arsonval 211.
— von Du Bois Reymond 252.
— von v. Helmholtz 207 Anm.
— Ablenkung des — 205.
— Dämpfung des — 214.
— Kalibrierung des — 206.
— Konstante des — 208.
Galvanoskop 194.
Gasbatterie 488.
Gase, Leitung der — 317.
— Widerstand der — 166. 309. 317.
Gassiot 317. 322.
Gaugain 74. 207 Anm.
Gauss 343. 347. 356. 360.
Gay-Lussac 329.
Gebundene Elektrizität 27. 79.
Gegenschaltung 412.
Geissler 315.
Generatoren 458. 468.
Gernez 246.
Geschwindigkeit des Lichtes 354. 513.
— der elektrischen Wellen 513.
— der Entladung 318.

Geschwindigkeit des Reibens 73.
— Widerstand als — 352.
Gesetz der umgekehrten Quadrate 19. 129. 143. 256. 265.
— der Elektrolyse 485.
— der elektromagnetischen Systeme 199. 374.
— von Lenz 451.
Gewitter 324. 325.
Gibson 292.
Gilbert 2. 10. 15. 86. 91. 92. 95. 97. 105. 106. 109. 119. 145. 309.
Glas, als Konduktor 31.
Glaselektrizität 5.
Gleitende Reibung 12. 73.
Glimmer 291.
Glocken, elektrische 503.
Glockenspiel, elektrisches 46.
Glühentladung 314. 324 Anm.
Glühlampen 447.
Goldblattelektroskop s. Elektroskop.
Gordon 292. 293. 308. 521.
Gramme 458.
Gravitationsbatterie 182.
Gray, A. 136 Anm. 282 Anm. 391 Anm.
Gray, S. 30. 324.
Grenze der Magnetisierung 358.
Grotthuss 167. 486.
Grove 124. 177. 309. 488.
Gruppierung von Bogenlampen 445.
— von Glühlampen 448.
— von Elementen 187. 402.
Guericke 4. 11. 41.
Guthrie 309. 428.

Härten des Stahls 108.
de Haldat 122.
Hall 392.
Hankel 286.
Harris 280. 282. 308.
Harzelektrizität 5.
Hauchfiguren 319.
Hauksbee 324.
Hauptkonduktor 42.
Hauy 196.
Heaviside 370 Anm. 492. 513.
v. Helmholtz 207 Anm. 249. 455. 486.
Hemiedrie 75.
Hemmende Wirkung 454. 468. 469.
Hemmspulen 469.
Henry 450. 492.
Henry, das 349. 449. 453.
Hertz 308. 316. 515. 526.
Heydweiller 308.
Hittorf 317.
Hochfrequenz 471. 510. 515.
Holtz 53. 316. 322.
Hopkinson 292. 294. 359. 461.
Horizontalkomponente 136. 148. 356.
Hughes, 140. 492. 507. 509.
v. Humboldt 76. 249. 250.
Hunter 249.
Hysteresis, magnetische 362. 363. 459.

Idiostatische Methode 285.
Impedenz 467. 469.
Indexbezeichnung 350.
Induktion, magnetische 96. 358 Anm.
— von Strömen 217.
Induktion-Konvexion-Maschine 49.
Induktionsapparat 224.
Induktionsschirm 452.
Induktive Kapazität 25. 56. 290. 294.
Influenz 22.
Influenzmaschine 49—54.
Inkandescenzlampen s. Glühlampen.
Inklination 147. 150.
Innerer Widerstand 166. 401. 412.
— — der Armatur 457.
Intensität des Stromes 185 Anm.
— des Erdmagnetismus 148. 353. 356.
— des magnetischen Feldes 333.
— der Magnetisierung 360.
Internationales Ohm 353.
Inversion, thermo-elektrische 418.
Ionen 234.
Isogonen und Isoklinen 149.
Isolation 266.
Isolatoren 10. 30. 400.

Jablochkoff 188. 446.
Jacobi 169. 375. 438. 490.
Jenkin 296. 318.
Joule 124. 328. 353. 358. 370. 379. 422. 434. 483.
Joule, das 349. 434.
Joule-Wirkung 415.

Kabel, atlantisches 296 Anm. 297. 318. 499.
— unterseeisches 499.
— als Kondensator 296. 318.
Kadmium-Element 183.
Käfig, elektrischer 37.

Käfig, magnetischer 97.
Kämme der Influenz-Maschine 42. 50.
Kalkspat 75.
Kalorie und Joule 422. 434.
Kapazität, Definition 266.
— eines Konduktors 40. 55. 267. 299.
— eines Kondensators 58. 289. 299. 468.
— einer Leydener Flasche 58. 289.
— eines Kabels 296 und folg.
— eines flüssigen Kondensators 487.
— Messung der — 413.
— Einheit der elektrostatischen — 267.
— Einheit der praktischen — 298.
— spezifische induktive 25. 26. 290. 299.
— beim Wechselstrom 468.
Kapillar-Elektrometer 248. 287.
Kapp 372.
Karten, magnetische 149.
Kaskaden-Anordnung 304.
Kathode 165. 231.
Kathodestrahlen 316.
Kation 234. 486.
Keeper 103.
Kelvin (Thomson) 49. 79. 89 Anm. 144. 182. 270. 282. 283. 294. 308. 328. 329. 353. 354. 391. 419. 510.
Kerr 125. 295. 361. 520. 522.
Kerze, elektrische 446.
Kinnersley 312.
Kirchhoff 404.
Kobalt 93.
Kochen durch Elektrizität 429.
Koeffizient der gegenseitigen Induktion 346. 449.
— der Selbstinduktion 453.
Koerzitivkraft 96. 362.
Kohlenfäden 447.
Kohlenplatten, Kohlenstäbe 178 Anm. 444.
Kohlrausch 235. 294. 353.
Kommutator 438. 456. 458.
Kompass 87. 144.
Kondensatoren 56. 289. 298.
— Gebrauch der — 224. 297. 298.
— Entladung der — 321. 510.
— Kapazität der — 413.
— im Wechselstromkreis 468. 469.
— flüssige 487.
— Widerstandsmessung durch — 406. 412.
Kondensator-Elektroskop 79.
Konduktoren 13.
— undurchsichtige 513.
Kontaktelektrizität s. elektr. Ströme.
Kontaktringe 456.
Kontraktion als Folge des Magnetismus 124.
Kontrollmethoden 204.
Konvexion 38. 47. 49. 269. 307. 324. 392.
Korkzieherregel 193.
Kraft, elektrische 164 Anm. 261. 271. 272.
— magnetische 91. 130. 164 Anm. 332.
— in der Nähe eines geraden Konduktors 202. 338.
Kräftepaar, magnetisches 136.
Kraftlinien, elektrische 13. 16. 20. 22. 24. 263.
— magnetische 96. 119. 120. 121. 197. 344. 357. 368. 372. 384. 459.
Kraftröhren 332.
Kraftübertragung 442. 474.
Kreis, magnetischer 370.
Krümmung, von Einfluss auf die Oberflächendichte 38. 269.
Krystalle, Elektrizität der — 74. 75.
— Dielektrische Eigenschaften der — 292.
— Magnetismus der — 368.
Krystallisation 69.
Kugel, Ladung einer — 38. 268 u. f.
— Potential einer — 264. 266.
— Kapazität einer — 266.
Kugelblitz 326.
Kundt 523.
Kurven, charakteristische 461.
— der Magnetisierung 359.
Kurvenzeichner 363.

Ladung, elektrische 8.
— Sitz der — an der Oberfläche 32.
— Restladung 61. 294.
— eines Akkumulators 487.
— Entweichung der — 321.
Ladungsapparat 282. 283.
Lamellarmagnete 104. 118.
Langley 399.
Laufrad 441.
Law 175.
Lebaillif 364.
Lebensdauer der Lampen 447.

Leclanché 179.
Leiter und Nichtleiter 8. 27. 30. 397 u. f.
Leitung 7. 30. 166. 397. 399. 471.
— von Flüssigkeiten 229. 399.
— von Gasen 166. 317.
Leitungsfähigkeit 166. 317. 341. 343. 397. 399.
Lemonnier 328.
Lenard 316.
Lenz 375. 451.
Leydener Flasche 55. 59.
— — zerlegbare 63.
— — Sitz der Ladung 63.
— — Entdeckung der — 60.
— — Entladung der — 59. 305. 510.
— — Kapazität der — 58. 289. 299.
— — Kaskadenbildung 304.
— — Energie der Ladung — 300.
— — Funken der — 313. 318.
— — Theorie der — 289.
— — Einheitsflasche 280.
— — Durchbohren des Glases 62.
— — Resonanz zwischen zwei — 512.
Licht, elektrisches 443.
— elektromagnetische Theorie des — 1. 513.
— polarisiertes 125. 521—523.
— von Einfluss auf den Magnet 519.
— von Einfluss auf den Widerstand 524.
— Geschwindigkeit des — 354. 513.
Lichtenberg's Figuren 319.
Lichtwirkungen des Funkens 313.
Linienintegral 336 Anm.
Lippmann 248. 287.
Lodge 512 516.
Lokale Wirkung 173.
Lokomotiven, elektrische 441.
Lorenz 353.
Ludwig XV. 249.
Luftkondensator 56. 289. 354.
Luftlücke 373.
Luftthermometer, elektrisches 312.
Lullin 310.

Magnete, natürliche und künstliche 84. 85. 103.
— zusammengesetzte 104.
— Formen der — 103.
— Zerbrechen der — 116.
— unveränderliche 110.
— Kraft der — 114.
Magnete, Lamellar — 104. 118. 472.
— Methoden zur Anfertigung der — 100—107.
— eisenbekleidete 378.
— Wirkung des Lichtes auf — 519.
Magneteisenerz 84. 178 Anm.
Magnetelektrische Maschinen 456.
Magnetisierung, anomale 368.
— lamellare 118.
— mechanische Wirkungen der — 124.
— Methoden 100—107.
— Solenoid- 118. 342.
— Intensität der — 360.
— erfordert Zeit 383.
Magnetische Wirkungen des Stromes 190. 333. 384.
— Körper 92. 357. 364.
Magnetisierungscyklen 362. 363.
Magnetismus 84.
— Verteilung des — 117.
— Lamellar- 118.
— Residual- 112. 359.
— Solenoid- 118. 342.
— temporärer — 98. 112.
— permanenter — 98.
— der Gase 365. 369.
— Vernichtung des — 109,
— Theorieen des — 99. 126. 521.
— Einheit des — 141. 347.
— Gesetze über — 89. 128. 332.
— Wirkung des — auf Licht 125. 126.
Magnetnadel 87. 144.
Magneto-Elektrizität 82. 217. 456.
Magnetographen 155.
Magneto-krystallische Wirkung 368.
Magnetometer 137. 155.
Magnetomotorische Kraft 336. 370.
Magneto-optische Rotation 519.
Magnetpol 141. 347.
Mance 412.
Manganstahl 358.
Mascart 330.
Maschine, Elektrisier- 42.
— Cylinder- 42.
— Scheibenelektrisier- 43.
— von Winter 43.
— Influenz- 49.
— von Töpler und Voss 51.
— von Wimshurst 52.
— von Holtz 53.
— magnetelektrische 456.
— Dynamo-elektrische — 456.

Maschine, Wechselstrom- 473.
Matteuci 76. 251. 252.
Maxwell 35. 126. 198. 199. 270. 294. 327. 344. 346. 354. 374. 392. 468. 513.
Maxwell'sche Regel 199. 374.
Mechanische Depolarisation 175.
Mechanische Wirkungen der Entladung 47. 310.
— — der Magnetisierung 124.
— — in dielektrischen Körpern 294. 520.
Medium, Wirkung im — 5. 13. 274.
— Elastizität und Dichte des — 355.
— Energiepfade im — 514.
— Geschwindigkeit der Wellen im — 354. 513.
Medizinische Anwendungen 253.
Megohm 349.
Meidinger 182.
Melloni 420.
Mendenhall 150.
Menge der Elektrizität 21. 257. 349.
Meridian, magnetischer 146
Messung der magnetischen Kräfte 130.
— der Ströme 216. 390. 407.
— der E.M.K. 411.
— des Widerstandes 406. 407.
— des innern Widerstandes 412.
— der Kapazität 413.
— der Permeabilität 361.
— der Arbeit 432.
— der gegenseitigen Induktion 449.
— der Selbstinduktion 453.
Metalle, magnetische 93. 357. 364.
— elektrochemische Kraft der — 484.
— elektr. Ausscheidung der — 489.
— spezifischer Widerstand der — 398.
Metallochromie 485.
Meterbrücke 410.
Metrisches System 275.
Mikrofarad, das 278. 349.
— Kondensator 298.
Mikrophon 507.
Milliampère 349.
Minotto 182.
Molekulare Wirkung des Magnetismus 126.
— — der Ströme 244.
Molekularmagnetismus 127.
Molekulartheorie der Elektrizität 7.
Moment, magnetisches 135. 341. 356.
— eines Kräftepaares 136.
Moment einer kreisförmigen Rolle 341.
Mordey 473.
Morse 494.
Motoren 438. 477. 479.
Moulton 317.
Mühle, elektrische 47.
Müller, Johannes 375.
Multicellular-Voltmeter 285.
Multiplikator 195.
Muskelzusammenziehung 250. 252.
Musschenbroek 60. 121.

Nachweis, chemischer — für schwache Ströme 241. 311.
— physiologischer — 250.
— für Fehler in Telegraphenlinien 497.
Nadeltelegraph 493.
Napoleon III. 188.
Natrium 485.
Nebengeleis 210. 404. 444. 460.
Negative Elektrizität 5. 322.
Netzwerk von Konduktoren 435.
Neutralisierende Bürsten 50.
Newton 11. 41. 91. 114. 324.
Niagarafall 442.
Niaudet 179.
Nichtleiter 10. 400.
Nickel 93. 359.
Nobili 76. 252. 485.
Nord- und Südpol 89. 145.
Nordlicht 153. 154. 156. 331.
Normalelement 183. 189.
Normalmaße 349.
Nullmethoden 205. 284. 406. 408. 411. 412. 413.
Nullpotential 40. 259.
Nutzeffekt, von Motoren 441.
— bei Transmissionen 442.
— von Dynamomaschinen 459.
— von Transformatoren 476.

Oberflächendichte 38. 268.
Oberflächen gleichen Potentials 262. 332.
Oberflächenverteilung 134. 332.
Oberirdische Linien 441.
Oel, dielektrische Stärke des — 310.
Oersted 190. 191. 197.
Ohm 185.
Ohm, das 349. 353.
Ohm'sches Gesetz 186. 394.
Optische Spannung 520.

Optische Rotation 521. 522. 523.
Oscillationen, elektrische 327. 510.
— Methode der — 133 134. 205. 356.
Oscillator 515. 517.
Osmose, elektrische 245.
Ozon 232. 311. 324 Anm.

Pacinotti 458.
Page 124.
Paradoxon, magnetisches 143.
Parallele Stromleiter 385.
Parallelschaltung 163. 302. 401. 404. 448. 474.
Paramagnetische Körper 364.
Passiver Zustand des Eisens 178.
Peace 308.
Peclet 73.
Peltier 281. 325. 329. 415.
Periode des Nordlichts und der magnetischen Stürme 153. 154. 331.
Periodische Ströme 465.
Permeabilität 93. 96. 358. 361. 513.
Perry 437.
Pferdekraft 430.
Pflanzen, Elektrizität der — 77. 251.
— fleischfressende 251.
Phase 465. 467.
Phosphorescenz 315. 316.
Photochemische Erregung 525.
Photographische Platte 319.
Photophon 524.
Physiologische Wirkungen 249. 320.
Piezo-Elektrizität 75.
Pistole, elektrische 311.
Planté 326. 487.
Platinoid 399.
Plücker 365. 368.
Poggendorff 175. 411.
Poisson 368.
Polarisation 170. 175. 482. 487.
Polarisationsebene, Rotation der — 521 u. ff.
Polarisierter Mechanismus 382.
Polarisiertes Relais 496.
Polarität, magnetische 90. 116. 126.
— diamagnetische 364.
Pole, der Magnete 86. 134.
— bezeichnete 88.
— der pyroelektrischen Krystalle 74.
— der Volta'schen Batterie 163.
Positive und negative Elektrisierung 5. 322.
Postamtbrücke 410.
Postamtrelais 496.
Potential, magnetisches 332. 342. 343. 346.
— elektrisches 40. 258.
— Null- 40. 259.
— einer leitenden Kugel 264.
— Abnahme des — 284. 407.
— zweier Stromkreise 347. 352.
Potentialdifferenz 260.
— magnetische 332.
Potentialgalvanometer 215.
Pouillet 207. 209.
Poynting 514.
Praktische Einheiten 349.
Preece 492.
Priestley 26 Anm. 295.
Probeplatte 32. 227.
Protoplasma 251.
Pulver, elektroskopische 31. 47. 294. 319.
— von Metallen 395. 516.
Pyro-Elektrizität 74.
Pyrometer 399.

Quadrant-Elektroskop 17.
— Elektrometer 283.
Quantität, Schaltung auf — 187. 402.
Quartz 30. 294.
Quellen der Elektrizität 12. 65.
Quetelet 328. 330.
Quincke 247. 295. 520.

Radio-Mikrometer 420.
Rayleigh 353.
Reflexion elektrischer Wellen 515.
Reibung als Elektrizitätsquelle 2. 12.
Reis 505.
Relais 496.
Remanenz 362.
Residuum-Ladung der Leydener Flasche 61. 294.
— — des Kabels 296.
— — des Voltameter 487.
Residuum-Magnetismus 112. 127. 362.
Resonanz 512.
Resonator 515.
Resultierende magnetische Kraft 115.
Rheometer, Rheoskop, Rheotrop 203 Anm.
Rheostat 395.
Richtung der induzierten E.M.K. 221. 451.

Riess 38. 308. 312.
Ritchie 370. 438.
Ritter 249. 251. 487.
de la Rive 200.
Röntgenstrahlen s. Anhang.
Romagnosi 190.
Romas 324.
Ronalds 492.
Rotation der Polarisationsebene 521.
— elektromagnetische 388.
— von Arago 452.
Rotierendes magnetisches Feld 480.
Rowland 370. 392.
Rücker 149. 355.
Rückschlag 29. 326.
de la Rue 181. 308. 490.
Ruhmkorff 224. 364. 449.

Sägemehl-Batterie 182.
Säkulare Aenderung des Erdmagnetismus 150.
Sättigung, magnetische 112. 126. 358.
Salze, Elektrolyse der — 233. 485.
Sanderson 251.
Sauerstoff, Magnetismus des — 365.
Saugmagnet 380.
Savery 85.
Schaale, magnetische 118. 198. 343. 345.
Schallenberger 437.
Schatten, elektrische 47. 316.
Scheibenarmatur 458.
Schifffahrt, elektrische 438.
Schirm, magnetischer 97.
Schlag, elektrischer 249. 320.
Schmelzen von Drähten 424.
Schrift, magnetische 122.
Schuckert 216.
Schuster 317.
Schutzring 268. 282.
Schwefel 180.
Schweigger 195.
Secohm 453.
Seebeck 414.
Seifenblase 4.
Sekundäre Batterieen 487.
Sekundäre Wirkungen bei der Elektrolyse 485.
Selbstaufzeichnende Apparate 155. 329.
Selbsterregende Influenzmaschine 50.
— Dynamo 457.
Selbstinduktion 453. 467. 510.
Selen, Widerstand des — 398. 524.
Selen, photoelektrische Eigenschaften des — 524.
Serienschaltung 163. 303. 401. 445. 460.
Serrin 444.
Sicherheitsschmelzer 424.
Siemens, A. 308.
— W. 294. 353. 390. 456.
Signalschlüssel 493.
Silurus 76.
Sinnpflanze 251.
Sinusgalvanometer 209.
Sinusgesetz 471.
Smee 175.
Smith 319. 524.
Solenoid 336. 380.
— Bogenlampen 444.
Spannung, elektrische 13. 16. 20. 22. 24. 63. 274. 294. 306. 520.
— dielektrische 64. 294. 520.
— magnetische 119. 335. 384.
Spannungsreihe 80.
Spezifische induktive Kapazität 25. 56. 290. 294.
Spezifischer Widerstand 398.
Spitzenwirkung 38. 42. 45. 46. 47. 269. 324.
Spottiswoode 317.
Sprengungen, elektrische 311. 427.
Stärke der dielektrischen Körper 294. 306.
— des Magnetpols 112. 347.
— einer magnetischen Schaale 343.
Stahl 108. 357. 490.
Starrkrampf 251.
Stewart 153. 330.
Stimmgabel-Methode. 413.
Strahlende Materie 316.
Streifen in luftleeren Röhren 315. 317.
Ströme, gleichgerichtete und entgegengesetzt gerichtete 218.
— sich kreuzende 385.
— Wirkungen der — 162.
— Messung sehr starker — 407.
Stromelement 339.
Stromkreis 161. 340. 401.
— magnetischer 370.
— Verzweigung des — 238. 404.
— Energiepunkte des — 243. 431.
Stromplatten 405.
Stromstärke 166. 185.
— Einheit der — 157. 202. 353 u. f
Stromwage 391.

Stürme, magnetische 154. 331.
Sturgeon 224. 370. 376. 456.
Sulzer 249.
Susceptibilität 360.
Swammerdam 250.
Swan 447.
Symmer 5.

Tait 71. 419. 428.
Telegraph, elektrischer 492.
— von Morse 494.
— Nadelapparat 493.
— chemischer 241.
Telegraphie, Gegensprechen und Doppelsprechen 498.
— unterseeische 499.
Telephon von Reis 505.
— von Edison 506.
— von Graham Bell 505.
— von Dolbear 294. 506.
— von Varley 294. 506.
— Stationen 508.
— Ströme des — 250.
Temperatur des Lichtbogens 443.
— Einfluss der — auf den Widerstand 189. 399. 421.
— Einfluss der — auf die Funkenlänge 308. 309.
Tempern des Stahls 108.
Terquem 34.
Theorie der Elektrolyse 486.
— des Lichts 513.
— des Erdmagnetismus 156.
Theorieen der Elektrizität 7. 322.
— des Magnetismus 99. 126. 127. 393.
Thermoelektrisches Diagramm 419.
Thermoelektrizität 78. 414.
Thermosäule 420.
Thompson 197. 322. 384. 513.
Thomson, Elihu 428. 437. 472.
Thomson, Joseph 81. 317.
Thomson-Effekt 419.
Thorpe 149.
Toepler 51.
Ton, magnetischer 124. 505.
Torpedo (Fisch) 76. 241.
Torpedos 311. 427.
Torsion 124.
Torsionsmethode 204. 205.
Torsionswage 18. 132.
Trägheit, elektromagnetische 453.
Trägheitsmoment 356.
Tragkraft der Magnete 113. 114.
— der Elektromagnete 379.
Transformatoren 223. 315. 475.
Trockenelement 179. 184. 188.
Trockene Säule 188. 286.
Trowbridge 111.
Turmalin 74. 319, 513.
Tyndall 367. 368.

Uhren, elektrische 504.
Ultra-violette Wellen 308. 526.
Umkehrbarkeit der Influenzmaschine 53.
— der Vorgänge im Schliessungsbogen 243. 431.
Unipolar-Maschinen 464.
Unterseeische Telegraphen 499.
Unveränderliche Magnete 110.
Upward 188.
Ure 250.

Vakuum 11. 64. 96. 97. 308. 315. 316.
Variationen des Erdmagnetismus 150. 151. 152.
Varley, C. 311. 487. 492.
— S. 294. 457. 505.
Verbindungswärme 483.
Verdampfen, Elektrisierung durch — 71. 325.
— Entladung durch — 246.
Verdet's Konstante 521.
Verdoppler 26. 49.
Verhältnis der elektrostatischen zu den elektromagnetischen Einheiten 278. 354.
Verschiebung, elektrische 57.
Verschiebungsströme 511.
Versilberung, elektrische 491.
Verstärkung, gegenseitige 49.
Versuchsplatte, magnetische 227.
Verteilung, elektrische 31—38. 268. 269.
— magnetische 117. 134.
— durch Transformatoren 475.
Verzögerung, magnetische 363.
— bei Wechselströmen 467.
— der Ströme durch Kabel 296. 318. 500.
Verzögerungswinkel 467. 468.
Vibration als Elektrizitätsquelle 67.
Villari 359.
Virtuelle Volt und Ampère 466.
Volt, das 164. 349.

Volta 26. 70. 79. 80. 158. 159. 160. 165. 249. 295. 329.
Voltameter 237. 238. 239. 482.
Volta'sche Batterie 159. 163. 173.
Volta'scher Bogen 443.
Volta'sches Element 161.
Voltmeter 215. 285. 425.
Voss 51.

Wärme und Widerstand 421. 434.
Wärmeausstrahlung 381. 424.
Wärmewirkung auf Magnete 109. 111.
— als Folge der Magnetisierung 124. 363.
— auf Batterieen 189.
— der Ströme 177. 421. 434.
— auf positive und negative Ladungen 309. 424.
— auf den Widerstand 399.
— auf Geissler'sche Röhren 315.
— der Funken 312.
— der dielektrischen Spannung 294.
— lokale — an den Elektroden 486.
Walker 180.
Warburg 363.
Wasser, Elektrolyse des — 230. 482.
Wassertropfapparat 329.
Watt, das 349. 430. 470.
Watt, scheinbare 433. 467. 470.
Wattmeter 433.
Weber 126. 127. 353. 354. 367. 389.
Weber, das 349.
Wechselströme 157. 456. 465.
Wechselstrommagnet 383. 472.
Wechselstrommaschinen 473.
Wechselstrommethode 412.
Wechselstrommotoren 479.
Wellen, elektrische 510.
Weston 183. 215. 399.
Wheatstone 314. 318. 408. 457. 492.
Wheatstone'sche Brücke 408.
Widerstand 30. 166. 395. 421.
— des menschlichen Körpers 250.
— der Gase 166. 317.
— der Luft 308. 321.
— der flüssigen Körper 166. 398.
— des leeren Raumes 316.
— spezifischer 398.
— innerer — des Elements 187. 402. 412.
— magnetischer 370. 406 u. f.
— der Glühlampen 447.
Widerstand gegen Wechselströme 471.
— Einheiten des — 347 u. f.
— Gesetze über — 395.
— als Geschwindigkeit 352.
Widerstand hängt ab
vom Magnetismus 392.
von der Temperatur 399.
vom Schall 507.
vom Licht 524.
Widerstandsbrücke 408.
Widerstandsrollen 409.
Wiedemann 124. 365 Anm.
Wiederverteilung der Ladung 39.
Wilcke 26 Anm.
Wilde 457.
Wimshurst 52.
Wind, elektrischer 47. 319.
Windungen der Elektromagnete 370. u. f. 380. 381.
Wirbel, magnetische 197. 384.
Wirbelströme 452. 472. 481.
Wirkung in die Ferne 25. 64. 294.
— im Medium 5. 13. 64. 274. 294.
Wismut, Diamagnetische Eigenschaften des — 94. 365.
— Widerstand des — 392.
Wöhler 188.
Wollaston 175.
Wroblewski 399.

Zamboni 16. 188. 286.
Zanotti 250.
Zeigerbrücke 410.
Zeitkonstante 455.
Zenti-Ampère-Wage 391.
Zentralstationen 435. 473.
— für Telephonie 508.
Zerbrechen eines Magnets 116.
Zersetzung des Wassers 230.
— der Alkalien 485.
Zink als Brennmaterial 161.
Zinnfolie-Kondensatoren 55. 297.
Zitteraal 76. 241.
Zitterrochen 76.
Zünder, elektrische 311. 424. 427.
Zufuhrbürsten 50.
Zufuhrmaße 437.
Zusammenschweissen 428.
Zwei-Fluida-Theorie 7.
Zweiphasenströme 480.
Zylindermaschine 42.